

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ

**Научный журнал** № 4 (40)



ISSN 2413 – 0133 Индекс E79114\*

#### EDITORIAL BOARD

#### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Аblameyko S.V. Абламейко С.В., академик НАН Беларуси, Минск, БГУ

Arshinskiy L.V. Аршинский Л.В., д.т.н., Иркутск, ИрГУПС

Boukhanovsky A.V.Бухановский А.В., д.т.н., Санкт-Петербург, НИУ ИТМОBychkov I.V.Бычков И.В., академик РАН, Иркутск, ИДСТУ СО РАНWoern H.Вѐрн Х., Германия, Karlsruhe Institute of Technology (КІТ)Voevodin V.V.Воеводин В.В., чл.-корр. РАН, Москва, НИВЦ МГУ

Wolfengagen V.E. Вольфенгаген В.Э., д.т.н., Москва, МИФИ Горнов А.Ю., д.т.н., Иркутск, ИДСТУ СО РАН

Gribova V.V. Грибова В.В., чл.-корр. РАН, д.т.н., Владивосток, ИАПУ ДВО РАН

Groumpos P. Грумпос П., Греция, University of Patras

Zorina Т.G. Зорина Т.Г., д.т.н., Республика Беларусь, Институт энергетики НАН Беларуси

Казаков А.Л., д.ф.-м.н., профессор РАН, Иркутск, ИДСТУ СО РАН Kalimoldaev M.N. Казаков М.Н., академик НАН РК, Республика Казахстан, ИИВТ

Кагрепко А.Р. Карпенко А.П., д.ф.-м.н., Москва, МГТУ им. Баумана Комендантова Н.П., РhD, Австрия, Лаксенбург, IIASA Курейчик В.В., д.т.н., профессор, Таганрог, ЮФУ

Lis R. Лис Р., Польша, Wroclaw University of Science and Technology

Магсhenko М.А. Марченко М.А. д.ф.-м.н., профессор РАН, Новосибирск, ИВМиМГ СО РАН

Massel L.V.Массель Л.В., д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАНMoskvichev V.V.Москвичев В.В., д.т.н., Красноярск, ФИЦ ИВТ

Ovtcharova J.

Овчарова Ж., Германия, Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
Попов Г.Т., Болгария, г. София, Технический университет
Сидоров Д.Н., д.ф-м.н., профессор РАН, Иркутск, ИСЭМ СО РАН

Smirnov S.V. Смирнов С.В., д.т.н., Самара, ИПУСС РАН

Stennikov V.A.Стенников В.А., академик РАН, Иркутск, ИСЭМ СО РАНStylios C.Стилос Х., Греция, Technological Educational Institute of EpirusTaratukhin V.V.Таратухин В.В., Германия, ERCIS, University of Muenster

Кhamisov O.V. Хамисов О.В., д.ф.-м.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН

Hodashinsky I.A. Ходашинский И.А., д.т.н., Томск, ТУСУР

Сhubarov L.B. Чубаров Л.Б., д.ф.-м.н., Новосибирск, ФИЦ ИВТ

#### **EXECUTIVE EDITORIAL**

#### ИСПОЛНИТЕЛЬНАЯ РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

~				*** *********
Chief Editor	Massel L.V.	Главный редактор	Массель Л.В.	д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СОРАН
Editor	Tuktarova P.A.	Редактор	Туктарова П.А.	к.э.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Editor	Gaskova D.A.	Редактор	Гаськова Д.А.	к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Editor	Massel A.G.	Редактор	Массель А.Г.	к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Tech. Editor	Popova M.D.	Техн. редактор	Попова М.Д.	Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Designer	Pesterey D.V.	Дизайнер	Пестерев Д.В.	Иркутск, ИСЭМ СО РАН

**Учредитель:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН)

#### Адрес учредителя, издателя и редакции

664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130 Тел: (3952) 42-47-00 Факс: (3952) 42-67-96

Сайт журнала - https://www.imt-journal.ru/

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ). Номер контракта 202-04/2016.

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук (по состоянию на 29.03.2022) по научным специальностям 1.2.2; 2.3.1; 2.3.3; 2.3.5; 2.4.5.

Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре. Регистрационный номер ПИ № ФС 77 – 73539 от 31.08.2018.

Отпечатано в типографии «Дубль Принт»

CC BY

Адрес типографии: 664046, г. Иркутск, ул. Волжская, 14

© Издательство ИСЭМ СО РАН

\*Подписка на журнал доступна со второго полугодия 2021 г.

Цена свободная (12+)

Дата выхода 01.12.2025 г. Тираж 50 экз.

	Содержание
Методологические аспекты информационных и математических технолог	ъ
Гвоздев В.Е., Бежаева О.Я., Ракипова А.С., Ракипов Р.Р.,	
Приходько В.Е., Тепляшин П.Н. Исследование каскадных отказов в	
системах сетей на основе модели «Дом качества»	5
Методы, технологии и приложения искусственного интеллекта	
Мостаков Н.А., Захарова А.А. Система поддержки обучения	
манипуляционных роботизированных комплексов для технологических	
операций	17
Ломакина Л.С., Двитовская А.Н., Корелин К.А. Диагностирование и	
прогнозирование состояний технических и технологических объектов на	L
основе ансамблевых технологий машинного обучения	26
Салимзянова Д.Д., Лисовская Е.Ю., Самойлов С.А. Оценка параметро	
стохастических потоков событий методами машинного обучения	38
Неда Фироз, Берестнева О.Г., Аксенов С.В. Обнаружение	20
мультимодальной депрессии с использованием многопотоковой модели	
Mood Insight Encoder (MMIE)	52
Математическое моделирование и его применение в научных исследовани	
Божко А.Н., Грошев С.В., Кузьмина И.А., Родионов С.В.	IAA
Комбинаторная модель изделия на основе разрезаний гиперграфа	78
Пауль С.В., Назаров А.А., Лапатин И.Л., Иванова А.С. Моделировани	
производительности облачного узла при коррелированном характере	10
нагрузки	90
Базилевский М.П., Шаманова А.Е. Повышение компетентности	70
сотрудников налоговой службы в сфере информационной безопасности	C
использованием модели логистической регрессии	102
использованием модели логиетической регрессии Математические, информационные и интеллектуальные технологии	
нтатематические, информационные и интеллектуальные технологии энергетике	Б
<b>Киушкина В.Р., Лукутин Б.В.</b> Информационная система поддержки	
управляющих решений в сфере энергетической безопасности	
управляющих решении в сфере энергетической осзопасности децентрализованных энергорайонов	114
Пяткова Н.И., Мамедов Т.Г. Особенности исследования влияния угроз	
энергетической безопасности на надежность энергоснабжения	
потребителей в современных условиях	128
	120
Цифровая экономика и управление	
Виноградов Г.П. Моделирование представлений агента в интеллектуальной организации	138
интеллектуальной организации <b>Быков Н.В., Костров М.А.</b> Исследование влияния беспилотных	136
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
автомобилей на динамику выбора между индивидуальным и	151
общественным транспортом	151
Волкова Т.А., Кузякина М.В., Карагян А.В., Ряскин А.А. Проблемы и	l
перспективы создания цифровых двойников объектов культурного	1.64
наследия Краснодарского края	164
Программные системы и комплексы	
Говорков А.С., Короткова К.Е. Совершенствование методов подбора	177
САПР при разработке цифровой модели объекта	175
Борисенко Ю.В., Борисенко В.И. Технология применения нейросети и	
програмирования чат-бота для определения параметров психологическог	
здоровья	187
Памяти Берестневой Ольги Григорьевны	200

	Content
Methodological aspects of information and mathematical technologies	
Gvozdev V.E., Bezhaeva O.Y., Rakipova A.S., Rakipov R.R.,	
Prikhodko V.E., Teplyashin P.N. Study of cascading failures in network	
systems based on the "House of quality" model	5
Methods, technologies, and applications of artificial intelligence	
Mostakov N.A., Zakharova A.A. System for training manipulation RTK for	
technological operations	17
Lomakina L.S., Dvitovskaya A.N., Korelin K.A. Diagnostics and forecasting	
of technical and technological object states based on ensemble machine learning	
technologies	26
Salimzyanova D.D., Lisovskaya E.Yu., Samoilov S.A. Estimation of stochastic	>
event flow parameters using machine learning methods	38
Firoz N., Berestneva O.G., Aksenov S.V. Multimodal depression detection	
using Multistream Mood Insight Encoder (MMIE)	52
Mathematical modeling and its application in scientific research	
Bozhko A.N., Groshev S.V., Kuzmina I.A., Rodionov S.V. Combinatorial	
model of product, based on hypergraph cutting	78
Paul S.V., Nazarov A.A., Lapatin I.L., Ivanova A.S. Modeling cloud node	
performance under correlated load conditions	90
Bazilevskiy M.P., Shamanova A.E. Improving the competence of tax service	
employees in the field of information security using a logistic regression model	102
Mathematical, information, and intelligent technologies in energy	
Kiushkina V.R., Lukutin B.V. Information system for supporting management	
decisions in the field of energy security of decentralized energy districts	114
<b>Pyatkova N.I., Mamedov T.G.</b> Features of the threats impact study on the	
energy supply reliability in modern conditions	128
Digital economy and management	
Vinogradov G.P. Modeling agent representations in an intelligent organization	138
Bykov N.V., Kostrov M.A. Impact of autonomous vehicles on transport mode	
choice between personal vehicles and public transport	151
Volkova T.A., Kuzyakina M.V., Karagyan A.V., Ryaskin A.A. Problems and	
prospects of creating digital twins of cultural heritage objects in the Krasnodar	
Region	164
Software systems and complexes	_
Govorkov A.S., Korotkova K.E. Improving methods for selecting CAD	
systems when developing an object digital model	175
Borisenko J.V., Borisenko V.I. The specifics of the neural network application	
and chatbot programming for mental health parameters diagnostics	187
In memory of Olga Grigorievna Berestneva	200

### Методологические аспекты информационных и математических технологий

УДК 004.052.2

DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.001

### Исследование каскадных отказов в системах сетей на основе модели «Дом качества»

Гвоздев Владимир Ефимович<sup>1</sup>, Бежаева Оксана Яковлевна<sup>1</sup>, Ракипова Алия Салаватовна<sup>1</sup>, Ракипов Радик Ралифович<sup>2</sup>, Приходько Владимир Евгеньевич<sup>3</sup>, Тепляшин Павел Николаевич<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Уфимский университет науки и технологий, Россия, Уфа, RakipovaAS@uust.ru

**Аннотация.** В работе рассматривается использование известной модели «Дом качества» (House of Quality – HoQ) как шаблона для структурного моделирования каскадных отказов, возникающих во взаимодействующих сетях. Использование HoQ делает возможным моделировать не только внезапные, но и постепенные отказы в системе сетей. Отличительной особенностью модели HoQ является то, что её использование позволяет не только формализовать процедуру построения каскада отказов, но и выделить динамически возникающие и исчезающие контуры, в состав которых могут входить компоненты как одной и той же, так и разных сетей.

**Ключевые слова:** система сетей, эмерджентность, Дом качества (HoQ), надежность, каскадные отказы, динамические возникающие и исчезающие циклы

**Цитирование:** Гвоздев В.Е. Исследование каскадных отказов в системах сетей на основе модели «дом качества» / В.Е. Гвоздев, О.Я. Бежаева, А.С. Ракипова, Р.Р. Ракипов, В.Е. Приходько, П.Н. Тепляшин // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. — № 4(40). — С. 5-16. — DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.001.

**Введение.** Отличительным признаком постиндустриальной эпохи является господство сетевых систем во всех сферах жизни общества. В [1] подчеркивается, что в настоящее время критически важной методологической проблемой является изучение эмерджентных явлений, обусловленных взаимопроникновением сетей разной природы. К числу таких проявлений относится снижение функциональной надежности сетей, обусловленное их объединением [2].

Тот факт, что окружающая нас действительность является системой сетей, т.е. совокупностью взаимодействующих сетей, функционирование которых зависит от сведений, получаемых из единого информационного пространства, качественно изменяет содержание задач управления. Возникло понятие сетецентрического управления, что является стимулом развития теоретических основ исследований сетевых систем. Например, в [3] представлена трехкомпонентная модель системы сетецентрического управления, представляющая собою холоническое образование сетей (именуемых «решетками»), а именно:

- системы получения информации о ситуации, в которой пребывают объекты и субъекты управления (сенсорная решетка);
- системы, предназначенные для комплексного анализа ситуаций на основе разнородной информации, поступающей от разных источников, поддержки принятия управленческих решений и передачи их в информационные системы исполнительных устройств (информационная решетка);
- системы гетерогенных киберфизических устройств, предназначенных для скоординированной деятельности в рамках заданий, полученных из информационной решетки (исполнительная решетка).

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>МЧС России, Россия, Москва

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>НИИ «Солитон», Россия, Уфа

Анализ литературных источников позволяет сделать следующие заключения о современном состоянии исследований в области моделирования каскадных отказов. К числу основополагающих работ в области моделирования, на которую ссылаются во многих других работах, является [4]. Во многих работах объектами исследования являются два вида сетей: искусственные сети, такие как Watts-Strogatz (WS), Erd″os-Rényi (Эрдеша-Реньи – ER), случайные регулярные (Random Regular – RR), Барабаши-Альберт (Barabási-Albert – BA), решетчатые сети [5-8], а также физически существующие сети, такие, как электрические сети, сети водоснабжения, Интернет [9] и др. Общепринятая исследовательская парадигма моделирования каскадных отказов заключается в построении взаимозависимых сетей с различными схемами взаимодействия подсетей и анализе различных топологических характеристик и особенностей связей: силы связи, характеристики устойчивости и направления связей, особенности деструктивных воздействий на характер каскадных отказов [8,10-14]. Характер деструктивного воздействия определяется подходом к выбору характера атаки: случайная атака (Random attack – RA), целенаправленная атака (targeted attack – TA) [12-15] и локализованная атака (localized attack – LA) [16-20].

В зависимости от фокуса, существующие исследования можно разделить на два класса: первый связан с изучением влияния топологии отдельных сетей на сценарии потока отказов; другой заключается в анализе влияния зависимостей между отдельными сетями на надежность системы сетей. Помимо упомянутых направлений, известны модели каскадных отказов, обусловленных перегрузкой узлов и каналов вследствие деструктивных воздействий разной природы, включая целенаправленные атаки [12, 21]. Известны исследования, направленные на изучение возможностей восстановления взаимозависимых сетей после разрушений [21-23]. В большинстве исследований системы сетей исходят из случайной природы отказов компонентов сетей, либо их злонамеренного уничтожения. При этом гораздо меньше исследований посвящено моделированию каскадов отказов, вызванных стихийными бедствиями [24]. Особенностью деструктивных воздействий этого типа является то, что компоненты инфраструктурных сетей жизнеобеспечения при таких воздействиях разрушаются лишь с некоторой вероятностью.

В литературных источниках отмечается, что известные положения теории надежности, ориентированные на обеспечение функциональной надежности технических систем, не покрывают всех задач, связанных с обеспечением функциональной надежности сетевых систем. Необходимость разработки новых и совершенствования известных в теории надежности подходов, методов и моделей обусловлена, с одной стороны, актуальностью задач повышения эффективности и результативности решения задач сетецентрического управления; с другой, критической важностью обеспечения функциональной надежности взаимодействующих сетей, с третьей — потребностью развития теоретических основ обеспечения функциональной надежности многоуровневых многослойных систем.

Настоящая работа посвящена рассмотрению использования известной модели «Дом качества» (House of Quality – HoQ) [25], являющейся фокусом известной концепции поэтапного развития качества (Quality Function Deployment), как основы моделирования каскадов отказов. Её использование позволяет моделировать сценарии развития каскадных отказов при инициирующих воздействиях, оказываемых на различные компоненты взаимосвязанных сетей, а также выделять динамически возникающие и исчезающие контуры. Предлагаемый подход относится к упомянутому ранее направлению, связанному с исследованием влияния структуры сетей и особенностей их взаимосвязей на структурную надежность системы сетей.

- **1. Концептуальная основа исследований.** Концептуальную основу моделирования каскадов отказов во взаимодействующих сетях составляет учет следующих свойств:
- 1) рассмотрение динамических взаимодействующих сетей, как «системы систем» [1], для которой типичным является возникновение различных неожиданных, в том числе нежелательных, ситуаций (в [26] отмечается наличие у сложных систем такого свойства, как «normal accident»). В [23, 27-32] введено понятие «сети сетей» («network of networks NON); в упомянутых источниках представлены результаты исследований процессов перколяции цепочечных, звездообразных и древовидных NON аналитическими и численными методами; отмеченное обстоятельство обосновывает использование различных методов моделирования свойств, как основы разноаспектного исследования свойств системы систем; выявленные в результате моделирования свойства объектов управления составляют основу проактивного управления;
- 2) членимость и целостность системы систем как объектов моделирования это предполагает при проведении исследований свойств «системы систем» выделение отдельных совокупностей взаимодействующих систем, каждой из которых, в зависимости от цели исследования, могут быть поставлены в соответствие свои модели; при этом совместное использование этих моделей создает основу для выявления эмерджентных свойств системы систем (как желательных, так и нежелательных) [26]; примером реализации этого свойства является моделирование каскадов, как в изолированных, так и во взаимодействующих сетях;
- 3) ситуативный подход, в рамках которого одной и той же системе, в зависимости от характера инициирующих событий, может быть поставлено в соответствие множество сценариев каскадов отказов [33], содержание которых, во-первых, зависит от характера (природы) инициирующего события, и, во-вторых, от того, на какой узел сети было оказано инициирующее воздействие; примером реализации ситуативного подхода является понятие «основное направление связи» [34], содержание которого может изменяться в зависимости от изменяющихся целей управления, которые, в свою очередь, определяются изменениями ситуаций в зоне ответственности субъекта управления.
- 2. Структурные модели взаимодействующих сетей. Сложным системам, в зависимости от уровня абстракции при изучении объекта и целей моделирования, может быть поставлено в соответствие множество моделей, поэтому для одной и той же системы, в зависимости от выбранной точки зрения на объект моделирования, можно поставить в соответствие различные структурные модели, различающиеся по степени детализации представления компонентов системы. Для получения сопоставимых структурных моделей необходимо определить единообразный подход к их построению.

В системе систем каждой из выделенных граней ставятся в соответствие цель управления и связанная с этим ситуация. Считаем, что для ситуации характерно следующее:

- а) наличие структуры фактов; под фактами понимаются сущности (объекты, процессы, явления), а также отношения и связи между ними;
- б) ситуациям, соответствующим разным системам в составе системы систем, можно поставить в соответствие множество структур (что соответствует известному принципу полиморфизма в описании систем); вид структур определяется точкой зрения на систему;
- в) ситуация характеризуется множеством качественных и количественных признаков, т.е. компоненты структур могут описываться параметрами, которым ставятся в соответствие разные шкалы.
  - г) ситуация рассматривается как сущность, изменяющаяся во времени.
- В рамках выделенных свойств ситуациям можно поставить в соответствие систему сетей, структура которых изменяется во времени. Связи между узлами описываются параметрами, которым ставятся в соответствие разные шкалы.

Формально проблемная ситуация (содержание этого понятия раскрывается, например, в [35]), соответствующая системе систем, может рассматриваться, как совокупность взаимосвязанных сетей. Урегулирование ситуации в рамках выделенной точки зрения на систему предполагает достижение цели в условиях ограничений на управляющие решения и действия. Описание системы систем посредством ситуаций создает основу для сбалансированного подхода к урегулированию проблемной ситуации в целом так, чтобы достижение целей в рамках одной из взаимодействующих систем не приводило к ухудшению ситуаций в других системах.

Для иллюстрации приведем следующий пример, в котором устанавливается связь бизнес-процессов и системы информационной поддержки управления бизнес-процессами в рамках методологии MDA (Model Driven Architecture) [36]. Пусть каждой грани системы систем соответствует организация, которая реализует бизнес-процессы. Реализация каждого бизнес-процесса обеспечивается информационной системой организации. Возможность реализации информационных сервисов в слое баз данных и приложений обеспечивается инфраструктурой информационной физической системы (хосты; переключатели; маршрутизаторы; сервера; каналы и т.д). Каждому слою ставится в соответствие своя сеть. Таким образом, имеются взаимодействующие сети, имеющих свои локальные цели управления. В целом, грани системы систем ставится в соответствие многослойная совокупность взаимодействующих структур: «физическая инфраструктура информационной системы – структура взаимодействующих информационных сервисов – структура бизнеспроцессов».

Факторами, определяющими ситуации, помимо объективных и субъективных свойств фактов, являются характеристики путей и контуров как внутри отдельных сетей, так и между сетями. Взаимозависимость ситуаций, соответствующих разным системам, проявляются в том, что действия, предпринимаемые для урегулирования ситуаций в одной из систем, могут инициировать события (в том числе с нежелательными последствиями) в других системах.

На основании изложенного можно заключить, что для изучения ситуаций и взаимозависимостей между ними в разных системах необходимо, с одной стороны, использовать систему гетерогенных моделей (полиморфизм моделей). С другой стороны, для получения сопоставимых оценок при изучении свойств систем, соответствующих разным граням, следует использовать однотипные подходы и методы (изоморфизм моделей).

В рамках высказанных соображений для исследования структуры каскадов отказов в паре взаимодействующих сетях представляется целесообразным использовалась известную рамочную конструкцию, именуемую «Дом качества» (англ. – House of Quality – HoQ) [25], которая представлена на рис. 1. Выбор обусловлен тем, что в рамках HoQ представляется возможность выделять не только пути и циклы в отдельных сетях, но и между взаимодействующими сетями. Это создает основу для выявления как желательных, так и нежелательных эмерджентных свойств сложных систем [37], а также, на наш взгляд, создает предпосылки в будущем для адаптации аппарата системных архетипов [38] в области исследования каскадов отказов. На рис. 1 для иллюстрации приведен пример представления взаимодействующих графов в виде HoQ. Заметим, что HoQ представляет шаблон для описания структур взаимодействующих сетей, инвариантный к виду структур. Представление компонентов («крыша», «веранда» HoQ) в случаях ориентированных и смешанных графов посредством треугольных матриц описано в [39].

Ограничением предлагаемой модели является то, что она ориентирована на исследование пары взаимодействующих сетей. Ребрам графов, представляемым посредством матриц, в зависимости от содержания связей, могут ставиться в соответствие характеристики, измеряемые в разных шкалах.

#### 3. Пример моделирования динамики каскада отказов во взаимодействующих сетях.

Одной из задач, создающих основу для целенаправленной деятельности по урегулированию проблемных ситуаций, является получение прогнозных оценок динамики изменения ситуаций во взаимодействующих сетях при тех либо иных инициирующих воздействиях [33].

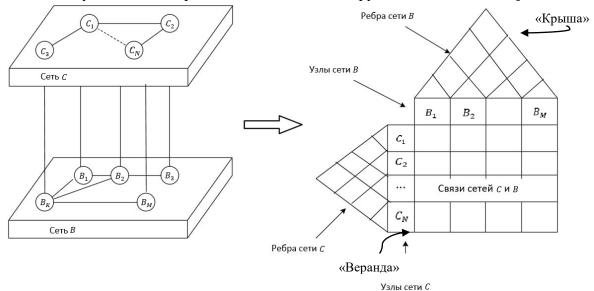


Рис. 1. Представление взаимодействующих сетей посредством HoQ

Рассмотрим пример качественного моделирования динамики каскада во взаимодействующих сетях с использованием модели HoQ. *Целью примера* является, вопервых, демонстрация того, что использование модели HoQ делает возможным фиксировать различия в изменении состояний узлов графов во времени; во-вторых, того, что можно одновременно оценивать изменения состояний узлов, принадлежащих разным графам; втретьих, того, что использование HoQ позволяет выделять динамически возникающие и исчезающие циклы.

Пусть взаимодействующие сети имеют вид, представленный на рис. 2. Для упрощения различимости узлов разных сетей системы при разработке сценария, узлы сети Ф будем обозначать квадратами; узлы сети К – кружками (в [40] подчеркивается, что построение топологий взаимодействующих сетей предполагает содержательный анализ объекта моделирования). Взаимодействующим графам ставится в соответствие HoQ, представленный на том же рисунке. Входящие ребра графа в модели HoQ в случае ориентированных графов представлены единицами над разделительными линиями клеток матрицы; исходящие стрелки – единицами, расположенными ниже разделительных линий. В случае неориентированных ребер нули либо единицы ставятся как выше, так и ниже разделительных линий.

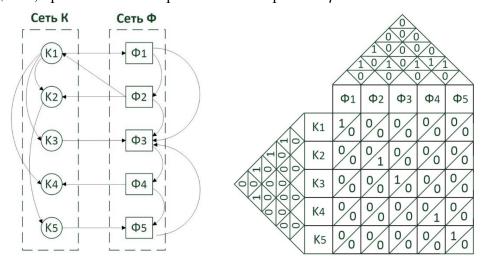
Предположим, что во взаимодействующих сетях имеет место процесс, которому ставится в соответствие системный архетип «эскалация» [37], причем инициирующее воздействие оказано на узел  $\Phi_2$ . Содержательным примером такого процесса может быть постепенное истощение ресурсов в узлах взаимодействующих сетей электроснабжения и водоснабжения [40].

При описании процесса время выражается тактами (интервалами времени между регистрируемыми состояниями узлов). Также предполагается, что каждому из узлов ставится в соответствие некоторый ресурс, который до начала развития каскада у всех узлов равен единице. Изменение (деградация) ресурса во всех узлах определяется по правилу

$$Q_{i}^{(m)} = Q_{i-1}^{(m-1)} - \sum_{l} Q_{i-1}^{(l)} (1 - \beta), \ l \neq m,$$

где  $Q_i^m(t)$  — характеристика ресурсов m-го узла на i-м шаге;

 $Q_{i-1}^{(l)}$  — характеристики ресурсов l-х узлов на (i-1)-м шаге, которые оказывают влияние на состояние m-го узла. Выходящие ребра l-х узлов являются входящими ребрами m-го узла;  $\beta$  — коэффициент, при вычислении принимавшийся равным  $\beta$  = 0.25.



**Рис. 2.** Представление взаимодействующих сетей посредством HoQ На рис. 3 представлены семь тактов каскада отказов.

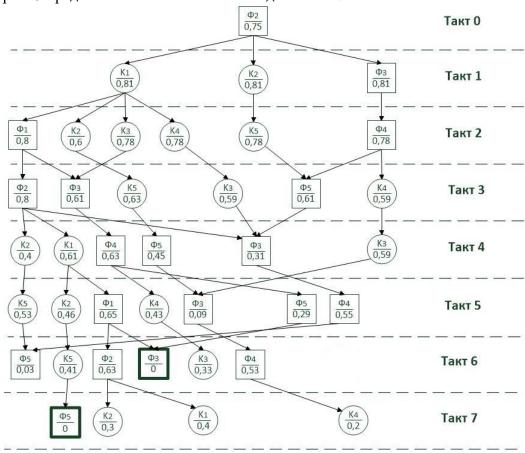


Рис. 3. Динамика изменения состояния узлов взаимодействующих сетей

В верхних частях квадратов/кружков указываются имена узлов графов. Ниже линий – объемы ресурсов, которыми обладают узлы. Жирным на рис. 3 выделено прекращение функционирования узлов  $\Phi$ 3 и  $\Phi$ 5 из-за отсутствия ресурсов.

В рассматриваемом примере каскад постепенных отказов из-за уменьшения ресурсов узлов графа делает возможным выделить динамически возникающие и исчезающие циклы между узлами графа. Например, для узла  $\Phi 3$  выделяются следующие циклы:

#### $\Phi 3 -> \Phi 4 -> \Phi 5 -> \Phi 3$

Цикл возникает на третьем такте. Время существования цикла — три такта. Заканчивается на шестом такте.

#### $\Phi 3 -> \Phi 4 -> K 4 -> K 3 -> \Phi 3$

 Цикл
 возникает
 на
 первом

 такте.
 Время существования

 цикла
 – четыре
 такта.

 Заканчивается на пятом такте.

#### $\Phi 3 -> \Phi 4 -> \Phi 5 -> \Phi 3$

Цикл возникает на первом такте. Время существования цикла — три такта. Заканчивается на четвертом такте.

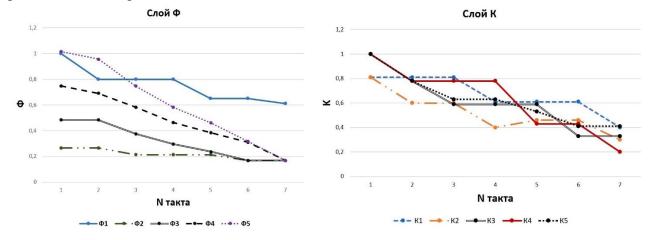
Таким образом, использование HoQ в качестве шаблона для описания взаимодействующих графов делает возможным выявлять динамические возникающие и исчезающие циклы в каскадах отказов. При этом в состав циклов могут входить узлы, входящие в состав как разных сетей, так и одной сети. Следует подчеркнуть, что отличительной особенностью построения каскада отказов на основе HoQ является то, что возможно выделять не только пути и циклы, но и время возникновения и исчезновения циклов.

В таблице 1 представлены значения ресурсов в разных узлах взаимодействующих графов, соответствующие разным тактам каскада. Заштрихованные клетки таблицы обозначают отказ узлов сети из-за исчерпания ресурсов, либо вследствие того, что узлы становятся поглощающими (потеря функциональности узла по причине отказа типа «отсутствие связности» [41]).

No moremo	Слой Ф				Слой К					
№ такта	Ф1	Ф2	Ф3	Ф4	Ф5	К1	К2	К3	К4	К5
1	1	1	0.81	1	1	0.81	0.81	1	1	1
2	0.8	1	0.81	0.78	1	0.81	0.6	0.78	0.78	0.78
3	0.8	0.8	0.61	0.78	0.61	0.81	0.6	0.59	0.78	0.63
4	0.8	0.8	0.31	0.63	0.45	0.61	0.4	0.59	0.78	0.63
5	0.65	0.8	0.09	0.55	0.29	0.61	0.46	0.59	0.43	0.53
6	0.65	0.63		0.53	0.03	0.61	0.46	0.33	0.43	0.41
7	0.65	0.63		0,53		0.4	0.3	0.33	0.2	0.41

Таблица 1. Значения ресурсов

На рис. 4-5 представлены графики изменения ресурсов узлов, принадлежащих разным сетям, во времени. Эти данные могут служить основой для построения обобщенных показателей надежности на основе аппарата статистических индексов методами, предложенными в работе [42].



**Рис. 4.** График изменения ресурсов узлов слоя Ф

**Рис. 5.** График изменения ресурсов узлов слоя К

Заключение. В качестве подхода для построения сопоставимых структурных моделей системы сетей, соответствующих разному видению объектов моделирования, предложено

использовать ситуационный подход. Такой подход создает основу для выработки сбалансированного подхода к урегулированию проблемных ситуаций, соответствующих разным граням сложной системы.

Для структурного моделирования каскадных отказов в паре взаимодействующих сетей предложено использовать известную модель HoQ. Целесообразность использования этой модели применительно к задаче моделирования каскадных отказов подтверждается тем, что имеется возможность моделировать не только внезапные, но и постепенные отказы узлов сети, обусловленные истощением ресурсов узлов. Отличительной особенностью использования модели HoQ является то, что она не только позволяет формализовать процедуру построения каскада отказов, но и делает возможным выделение динамически возникающих и исчезающих циклов, в состав которых могут входить компоненты как одной и той же, так и разных сетей.

#### Список источников

- 1. Дугин А. «Сетевые войны». Аналитический доклад Александра Дугина при участии Валерия Коровина и Александра Бовдунова / А. Дугин // Сети, когнитивная наука, управление сложностью, 2014. URL: https://spkurdyumov.ru/networks/setevye-vojny/.
- 2. Lee K., Lee H.-W., Modiano E. Reliability in layered networks with random link failures. Proceedings of the 29th Conference on Information communications, ACM transactions on networking, 2010, vol. 19, no. 6, 10 p.
- 3. Сурма И.В. «Сетецентрическое управление»: современная парадигма развития систем управления в вооруженных силах ведущих держав мира / И.В. Сурма, В.И. Анненков, В.В. Карпов, А.В. Моисеев // Национальная безопасность. 2014. № 2(31). 11c. DOI: 10.7256/2073—8560.2014.2.11393.
- 4. Buldyrev S.V., Parshani R., Paul G., et al. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks. Nature, 2010, vol. 464, 4 p., DOI: 10.1038/nature08932
- 5. Martin-Hernandez J., Wang H., Van Mieghem P., et al. Algebraic connectivity of interdependent networks. Physica A, 2014, vol. 404, pp. 92-105.
- 6. Bashan A., Berezin Y., Buldyrev S.V., et al. The extreme vulnerability of interdependent spatially embedded networks. Nature Physics, 2013, vol. 9, pp. 667-672.
- 7. Li W., Bashan A., Buldyrev S.V., Stanley H.E., et al. Cascading failures in interdependent lattice networks: The critical role of the length of dependency links. Physical review letters, 2012, vol. 108, 228702, DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.228702.
- 8. Buldyrev S.V., Shere N.W., Cwilich G.A. Interdependent networks with identical degrees of mutually dependent nodes. Physical Review E, 2011, vol. 83, 016112, DOI: 10.1103/PhysRevE.83.016112.
- 9. Wang S., Hong L., Ouyang M., et al. Vulnerability analysis of interdependent infrastructure systems under edge attack strategies. Safety science, 2013, no. 51, pp. 328-337.
- 10. Valdez L.D., Macri P.A., Stanley H.E., et al. Triple point in correlated interdependent networks. Physical review E, 2013, vol. 88, 050803, DOI: 10.1103/PhysRevE.88.050803.
- 11. Wang J., Jiang C., Qian J. Robustness of interdependent networks with different link patterns against cascading failures. Physica A, 2014, vol. 393, pp. 535-541.
- 12. Chen Z., Du W.-B., Cao X.-B., et al. Cascading failure of interdependent networks with different coupling preference under targeted attack. Chaos, solitons & fractals, 2015, no. 80, pp. 7-12.
- 13. Tan F., Xia Y., Wei Z. Robust-yet-fragile nature of interdependent networks. Physical review E, 2015, vol. 91, 052809, DOI: 10.1103/PhysRevE.91.052809
- 14. Jun T., Piera M.A., Ruiz S. A causal model to explore the ACAS induced collisions. Journal of aerospace engineering, 2014, vol. 228, no. 10, pp. 1735-1748.
- 15. Du R., Dong G., Tian L., et al. Targeted attack on networks coupled by connectivity and dependency links. Physica A, 2016, vol. 450, pp. 687-699.
- 16. Berezin Y., Bashan A., Danziger M.M., et al. Localized attacks on spatially embedded networks with dependencies. Scientific reports, 2015, vol. 5, 8934. DOI: 10.1038/srep08934.
- 17. Shao S., Huang X., Stanley H.E., et al. Percolation of localized attack on complex networks. New journal of physics, 2015, vol. 17, 023049. DOI: 10.1088/1367-2630/17/2/023049.
- 18. Wu B., Tang A., Wu J. Modeling cascading failures in interdependent infrastructures under terrorist attacks. Reliability engineering & system safety, 2016, no. 147, pp. 1-8.
- 19. Dong G., Hao H., Du R., et al. attack on clustering networks. New Journal of Physics, 2019, vol. 21, no. 1. DOI: 10.1088/1367-2630/aaf773.
- 20. Yuan X., Dai Y., Stanley H.E., Havlin S. K-core percolation on complex networks: Comparing random, localized, and targeted attacks. Physical Review E, 2016, vol. 93, 062302. DOI: 10.1103/PhysRevE.93.062302.

- 21. Qiu Y. Optimal weighting scheme and the role of coupling strength against load failures in degree-based weighted interdependent networks. Physica A, 2013, vol. 392, pp. 1920-1924.
- 22. Stippinger M., Kertesz J. Enhancing resilience of interdependent networks by healing. Physica A, 2014, vol. 416, pp. 481-487.
- 23. Hong S., Lv C., Zhao T., et al. Cascading failure analysis and restoration strategy in an interdependent network. Physica A, 2016, vol. 49, pp. 1-11.
- 24. Dong G., Hao H., Du R., et al. Localized attack on clustering networks. arXiv, 2016, DOI: 10.48550/arXiv.1610.04759.
- 25. Quality Function Deployment (QFD): Key Components of QFD. January 9, 2024, available at: https://bgmcgroup.com/quality-function-deployment-qfd-key-components-of-qfd/ (accessed:01/20/2024).
- 26. Holland O.T. Taxonomy for the modeling and simulation of emergent behavior systems. Proceedings of spring simulation multiconference "Society for Computer Simulation International", 2007, vol. 2, pp. 102-109, DOI: 10.1145/1404680.1404684.
- 27. Gao J., Buldyrev S.V., Havlin S., et al. Robustness of a tree-like network of interdependent networks. arXiv, 2011. DOI: 10.1103/PhysRevE.85.066134.
- 28. Gao J., Buldyrev S.V., Havlin S., et al. Robustness of a network of networks. Physical Review Letters, 2011, vol. 107, 193903. DOI: 10.1103/PhysRevLett.107.195701.
- 29. Gao J., Buldyrev S.V., Havlin S., et al. Robustness of a network formed by n interdependent networks with a one-to-one correspondence of dependent nodes. Physical Review E, 2012, vol. 85, 066134. DOI: 10.1103/PhysRevE.85.066134.
- 30. Gaogao D., Ruijin D., Lixin T., et al. Robustness of network of networks with interdependent and interconnected links. Physica A, 2013, vol. 424, pp. 11–18.
- 31. Dong G., Gao J., Du R., Tian L., et al. Robustness of network of networks under targeted attack. Physical Review E, 2013, vol. 87, 052804. DOI: 10.1103/PhysRevE.87.052804.
- 32. Dong G., Tian L., Zhou D., et al. Robustness of n interdependent networks with partial support-dependence relationship. Europhysics Letters, 2013, vol. 102, no. 6. DOI: 10.1209/0295-5075/102/68004.
- 33. Kaplan S., Zlotin B., Visnepolschi S., Zusman A. New tools for failure and risk analysis: an introduction to anticipatory failure determination (AFD) and the theory of scenario structuring. Ideation International Incorporated, 1999, 83 p.
- 34. ГОСТ Р 53111 2008. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки, 2009. 19 с.
- 35. Виттих В.А. Введение в теорию интерсубъективного управления / В.А. Виттих. Самара: Самарский научный центр РАН, 2013. 64 с.
- 36. Brown A.W. Model driven architecture: principles and practice. Software and Systems Modeling, 2004, vol. 3, pp. 314–327. DOI: 10.1007/s10270-004-0061-2.
- 37. Braun W. The system archetypes. Copyright, 2002, 26 p.
- 38. Гвоздев В.Е. Анализ влияния качества управления проектом на состояние функциональной безопасности аппаратно-программных комплексов на основе системного архетипа «предел роста» / В.Е. Гвоздев, М.Б. Гузаиров, О.Я. Бежаева // Моделирование, оптимизация и информационные технологии, 2021. Т. 9(3). С. 1-15. DOI: 10.26102/2310-6018/2021.34.3.026.
- 39. Гвоздев В.Е. Анализ структурной надежности многослойных взаимодействующих сетей передачи данных / В.Е. Гвоздев, О.Я. Бежаева, А.С. Ракипова, и др. // Всерос. Научная конференция «Опыт и перспективы совершенствования систем связи и акустических испытаний современной техники», г. Санкт-Петербург, 2025.
- 40. Dunn S., Holmes M., Wilkinson S. Modelling interdependent cascading failures in real world complex networks using a functional dependency model. Resilience and Reliability of Infrastructures, 2024, 6 p., available at: https://core.ac.uk/download/pdf/29416083.pdf
- 41. Николаев В.И. Системотехника: методы и приложения / В.И. Николаев, В.М. Брук. Л.: Машиностроение, 1985. 199 с.
- 42. Гаскаров Д.В. Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры / Д.В. Гаскаров, Т.А. Голинкевич, А.В. Мозгалевский. М.: «Советское радио», 1974. 224 с.

**Гвоздев Владимир Ефимович.** Д.т.н., профессор, профессор кафедры технической кибернетики Уфимского университета науки и технологий. AuthorID: 174520, SPIN: 7043-9040, ORCID: 0009-0004-8557-3445, Scopus AuthorID: 7101700484, wega55@mail.ru. 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

**Бежаева Оксана Яковлевна.** К.т.н., доцент, заведующий кафедрой технической кибернетики Уфимского университета науки и технологий. AuthorID: 271220, SPIN: 9785-3875, ORCID: 0000-0002-3373-7266, Scopus AuthorID: 57216845244, obezhaeva@gmail.com. 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

**Ракипова Алия Салаватовна.** К.т.н., доцент кафедры технической кибернетики Уфимского университета науки и технологий. AuthorID: 869995, SPIN: 3553-4512, ORCID: 0000-0002-7548-2134:, Scopus AuthorID: 57200183868, RakipovaAS@uust.ru, 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

**Ракипов Радик Ралифович.** Начальник отдела Департамента тылового и технического обеспечения МЧС России. AuthorID: 1288037, SPIN: 8024-1941, radikrakipovnsav@mail.ru, 121357, г. Москва, ул. Ватутина, 1.

**Приходько Владимир Евгеньевич.** Заместитель генерального директора по исследованиям и разработкам НИИ «Солитон». AuthorID: 1311599, SPIN: 5561-6677, v.prihodko@soliton.com.ru, 450080, г. Уфа, ул. С. Злобина, 31.

**Тепляшин Павел Николаевич.** Начальник отдела вычислительной техники и программирования НИИ «Солитон». AuthorID: 1310228, SPIN: 7724-6529, tepik@soliton.com.ru, 450080, г. Уфа, ул. С. Злобина, 31.

UDC 004.052.2

DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.001

### Study of cascading failures in network systems based on the "House of quality" model

Vladimir E. Gvozdev<sup>1</sup>, Oxana Y. Bezhaeva<sup>1</sup>, Aliya S. Rakipova<sup>1</sup>, Radik R. Rakipov<sup>2</sup>, Vladimir E. Prikhodko <sup>3</sup>, Pavel N. Teplyashin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ufa university of science and technology, Russia, Ufa, RakipovaAS@uust.ru

**Abstract.** The paper considers the use of the well-known House of Quality (HoQ) model as a template for structural modeling of cascade failures occurring in interacting networks. The use of HoQ makes it possible to model not only sudden, but also gradual failures in a network system. A distinctive feature of the HoQ model is that its use allows not only to formalize the procedure for constructing a cascade of failures, but also to single out dynamically emerging and disappearing contours, which may include components of both the same and different networks.

**Keywords:** network system, emergence, House of Quality (HoQ), reliability, cascading failures, dynamic emerging and disappearing cycles

#### References

- 1. Dugin A. "Setevye vojny". Analiticheskij doklad Aleksandra Dugina pri uchastii Valeriya Korovina i Aleksandra Bovdunova ["Network Wars". Analytical report by Alexander Dugin with the participation of Valery Korovin and Alexander Bovdunov]. Seti, kognitivnaya nauka, upravlenie slozhnost'yu [Networks, Cognitive Science, Complexity Management], 2014, svailable at: https://spkurdyumov.ru/networks/setevye-vojny/ (accessed: 08.20.2024).
- 2. Lee K., Lee H.-W., Modiano E. Reliability in layered networks with random link failures. Proceedings of the 29th Conference on Information Communications, ACM Transactions on Networking, 2010, vol. 19, no. 6, 10 p.
- 3. Surma I.V., Annenkov V.I., Karpov V.V., et al. "Setecentricheskoe upravlenie": sovremennaya paradigma razvitiya sistem upravleniya v vooruzhennyh silah vedushchih derzhav mira ["Network-Centric Management": modern paradigm of management systems development in the armed forces of the world's leading powers]. Nacional'naya bezopasnost' [National Security], 2014, no. 2(31), 11 p., DOI: 10.7256/2073-8560.2014.2.11393.
- 4. Buldyrev S.V., Parshani R., Paul G., et al. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks. Nature, 2010, vol. 464, 4 p., DOI: 10.1038/nature08932.
- 5. Martin-Hernandez J., Wang H., Van Mieghem P., et al. Algebraic connectivity of interdependent networks. Physica A, 2014, vol. 404, pp. 92-105.
- 6. Bashan A., Berezin Y., Buldyrev S.V., et al. The extreme vulnerability of interdependent spatially embedded networks. Nature Physics, 2013, vol. 9, pp. 667-672.
- 7. Li W., Bashan A., Buldyrev S.V., Stanley H.E., et al. Cascading failures in interdependent lattice networks: The critical role of the length of dependency links. Physical review letters, 2012, vol. 108, 228702, DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.228702.
- 8. Buldyrev S.V., Shere N.W., Cwilich G.A. Interdependent networks with identical degrees of mutually dependent nodes. Physical Review E, 2011, vol. 83, 016112, DOI: 10.1103/PhysRevE.83.016112.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>EMERCOM of Russia, Russia, Moscow

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Research institute «Soliton», Russia, Ufa

- 9. Wang S., Hong L., Ouyang M., et al. Vulnerability analysis of interdependent infrastructure systems under edge attack strategies. Safety science, 2013, no. 51, pp. 328-337.
- 10. Valdez L.D., Macri P.A., Stanley H.E., et al. Triple point in correlated interdependent networks. Physical review E, 2013, vol. 88, 050803, DOI: 10.1103/PhysRevE.88.050803.
- 11. Wang J., Jiang C., Qian J. Robustness of interdependent networks with different link patterns against cascading failures. Physica A, 2014, vol. 393, pp. 535-541.
- 12. Chen Z., Du W.-B., Cao X.-B., et al. Cascading failure of interdependent networks with different coupling preference under targeted attack. Chaos, solitons & fractals, 2015, no. 80, pp. 7-12.
- 13. Tan F., Xia Y., Wei Z. Robust-yet-fragile nature of interdependent networks. Physical review E, 2015, vol. 91, 052809, DOI: 10.1103/PhysRevE.91.052809.
- 14. Jun T., Piera M.A., Ruiz S. A causal model to explore the ACAS induced collisions. Journal of aerospace engineering, 2014, vol. 228, no. 10, pp. 1735-1748.
- 15. Du R., Dong G., Tian L., et al. Targeted attack on networks coupled by connectivity and dependency links. Physica A, 2016, vol. 450, pp. 687-699.
- 16. Berezin Y., Bashan A., Danziger M.M., et al. Localized attacks on spatially embedded networks with dependencies. Scientific reports, 2015, vol. 5, 8934. DOI: 10.1038/srep08934.
- 17. Shao S., Huang X., Stanley H.E., et al. Percolation of localized attack on complex networks. New journal of physics, 2015, vol. 17, 023049. DOI: 10.1088/1367-2630/17/2/023049.
- 18. Wu B., Tang A., Wu J. Modeling cascading failures in interdependent infrastructures under terrorist attacks. Reliability engineering & system safety, 2016, no. 147, pp. 1-8.
- 19. Dong G., Hao H., Du R., et al. attack on clustering networks. New Journal of Physics, 2019, vol. 21, no. 1. DOI: 10.1088/1367-2630/aaf773.
- 20. Yuan X., Dai Y., Stanley H.E., Havlin S. K-core percolation on complex networks: Comparing random, localized, and targeted attacks. Physical Review E, 2016, vol. 93, 062302. DOI: 10.1103/PhysRevE.93.062302.
- 21. Qiu Y. Optimal weighting scheme and the role of coupling strength against load failures in degree-based weighted interdependent networks. Physica A, 2013, vol. 392, pp. 1920-1924.
- 22. Stippinger M., Kertesz J. Enhancing resilience of interdependent networks by healing. Physica A, 2014, vol. 416, pp. 481-487.
- 23. Hong S., Lv C., Zhao T., et al. Cascading failure analysis and restoration strategy in an interdependent network. Physica A, 2016, vol. 49, pp. 1-11.
- 24. Dong G., Hao H., Du R., et al. Localized attack on clustering networks. arXiv, 2016, DOI: 10.48550/arXiv.1610.04759.
- 25. Quality Function Deployment (QFD): Key Components of QFD. January 9, 2024, available at: https://bgmcgroup.com/quality-function-deployment-qfd-key-components-of-qfd/ (accessed:01/20/2024).
- 26. Holland O.T. Taxonomy for the modeling and simulation of emergent behavior systems. Proceedings of spring simulation multiconference "Society for Computer Simulation International", 2007, vol. 2, pp. 102-109, DOI: 10.1145/1404680.1404684.
- 27. Gao J., Buldyrev S.V., Havlin S., et al. Robustness of a tree-like network of interdependent networks. arXiv, 2011. DOI: 10.1103/PhysRevE.85.066134.
- 28. Gao J., Buldyrev S.V., Havlin S., et al. Robustness of a network of networks. Physical Review Letters, 2011, vol. 107, 193903. DOI: 10.1103/PhysRevLett.107.195701.
- 29. Gao J., Buldyrev S.V., Havlin S., et al. Robustness of a network formed by n interdependent networks with a one-to-one correspondence of dependent nodes. Physical Review E, 2012, vol. 85, 066134. DOI: 10.1103/PhysRevE.85.066134.
- 30. Gaogao D., Ruijin D., Lixin T., et al. Robustness of network of networks with interdependent and interconnected links. Physica A, 2013, vol. 424, pp. 11-18.
- 31. Dong G., Gao J., Du R., Tian L., et al. Robustness of network of networks under targeted attack. Physical Review E, 2013, vol. 87, 052804. DOI: 10.1103/PhysRevE.87.052804.
- 32. Dong G., Tian L., Zhou D., et al. Robustness of n interdependent networks with partial support-dependence relationship. Europhysics Letters, 2013, vol. 102, no. 6. DOI: 10.1209/0295-5075/102/68004.
- 33. Kaplan S., Zlotin B., Visnepolschi S., Zusman A. New tools for failure and risk analysis: an introduction to anticipatory failure determination (AFD) and the theory of scenario structuring. Ideation International Incorporated, 1999, 83 p.
- 34. GOST R 53111–2008. Ustojchivost' funkcionirovaniya seti svyazi obshchego pol'zovaniya. Trebovaniya i metody proverki [Stability of functioning of the public communication network. Requirements and testing methods]. Moscow, Standartinform Publ., 19 p.
- 35. Vittih V.A. Vvedenie v teoriyu intersub"ektivnogo upravleniya [Introduction to the theory of intersubjective management]. Samara, Samarskij nauchnyj centr RAN [Samara scientific center of RAS], 2013, 64 p.
- 36. Brown A.W. Model driven architecture: principles and practice. Software and Systems Modeling, 2004, vol. 3, pp. 314–327. DOI: 10.1007/s10270-004-0061-2.
- 37. Braun W. The system archetypes. Copyright, 2002, 26 p.

- 38. Gvozdev V.E., Guzairov M.B., Bezhaeva O.Ya. Analiz vliyaniya kachestva upravleniya projektom na sostoyanie funkcional'noj bezopasnosti apparatno-programmnyh kompleksov na osnove sistemnogo arhetipa «predel rosta» [Analysis of the influence of project management quality on the functional safety state of hardware-software complexes based on the "limits to growth" system archetype]. Modelirovanie, optimizaciya i informacionnye tehnologii [Modeling, Optimization and Information Technologies], 2021, vol. 9, no. 3, pp. 1-15. DOI: 10.26102/2310-6018/2021.34.3.026.
- 39. Gvozdev V.E., Bezhaeva O.Ya., Rakitova A.S., et al. Analiz strukturnoj nadezhnosti mnogoslojnyh vzimodejstvuyushchih setej peredachi dannyh [Analysis of structural reliability of multilayer interacting data transmission networks]. Vseros. nauchnaya konferenciya "Opyt i perspektivy sovershenstvovaniya sistem svyazi i akusticheskih ispytanij sovremennoj tehniki" [All-Russian Scientific Conference "Experience and Prospects for Improving Communication Systems and Acoustic Tests of Modern Equipment"]. Saint Petersburg, 2025.
- 40. Dunn S., Holmes M., Wilkinson S. Modelling interdependent cascading failures in real world complex networks using a functional dependency model. Resilience and reliability of infrastructures, 2024, 6 p., available at: https://core.ac.uk/download/pdf/29416083.pdf
- 41. Nikolaev V.I., Bruk V.M. Sistemotehnika: metody i prilozheniya [System Engineering: Methods and Applications]. Leningrad, Mashinostroenie [Mechanical engineering] Publ., 1985, 199 p.
- 42. Gaskarov D.V., Golinkevich T.A., Mozgalevskij A.V. Prognozirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya i nadezhnosti radioelektronnoj apparatury [Forecasting the Technical Condition and Reliability of Electronic Equipment]. Moscow, Sovetskoe radio [Soviet radio] Publ., 1974, 224 p.

Gvozdev Vladimir Efimovich. Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technical Cybernetics, Ufa University of Science and Technology. AuthorID: 174520, SPIN: 7043-9040, ORCID: 0009-0004-8557-3445, Scopus AuthorID: 7101700484, wega55@mail.ru, 450008, Ufa, K. Marx St., 12.

Bezhaeva Oxana Yakovlevna. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Technical Cybernetics, Ufa University of Science and Technology. AuthorID: 271220, SPIN: 9785-3875, ORCID: 0000-0002-3373-7266, Scopus AuthorID: 57216845244, obezhaeva@gmail.com, 450008, Ufa, K. Marksa St., 12.

Rakipova Aliya Salavatovna. Candidate Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technical Cybernetics, Ufa University of Science and Technology. AuthorID: 869995, SPIN: 3553-4512, ORCID: 0000-0002-7548-2134, Scopus AuthorID: 57200183868, RakipovaAS@uust.ru, 450008, Ufa, K. Marksa str., 12.

Rakipov Radik Ralifovich. Head of the Technical Support Division, EMERCOM of Russia. AuthorID: 1288037, SPIN: 8024-1941, radikrakipovnsav@mail.ru, 121357, Moscow, Vatutina St., 1.

**Prikhodko Vladimir Evgenievich.** Deputy Director General for Research and Development, Soliton Research Institute. AuthorID: 1311599, SPIN: 5561-6677, v.prihodko@soliton.com.ru, 450080, Ufa, S. Zlobina St., 31.

**Teplyashin Pavel Nikolaevich.** Head of the Computer Science and Programming Department, Soliton Research Institute. AuthorID: 1310228, SPIN: 7724-6529, tepik@soliton.com.ru, 450080, Ufa, S. Zlobina St., 31.

Статья поступила в редакцию 08.04.2025; одобрена после рецензирования 24.09.2025; принята к публикации 16.10.2025.

The article was submitted 04/08/2025; approved after reviewing 09/24/2025; accepted for publication 10/16/2025.

#### Методы, технологии и приложения искусственного интеллекта

УДК 004.896

DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.002

### Система поддержки обучения манипуляционных роботизированных комплексов для технологических операций

#### Мостаков Николай Алексеевич, Захарова Алёна Александровна

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Россия, Москва, zaawmail@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается работа манипуляционных роботизированных комплексов для наиболее популярных задач в индустрии. В статье приводится реализация классических методов захвата объектов с использованием CAD-модели объекта, отмечены их преимущества и недостатки. В качестве нового решения предложено использовать систему, основанную на применении нейросети архитектуры Action Chunking with Transformers (ACT). Статья детализирует применение нейросетей архитектуры ACT, алгоритм обучения нейросетей и их запуска в рамках технологических операций реальных производств. В работе приводится описание аппаратной части системы, в состав которой входит Коллаборативный манипулятор ARM95, камера глубины RealSense Depth Camera D405 и трекер положения HTC VIVE. В качестве экспериментальной части работы были рассмотрены следующие технологические операции: захват объекта "коробка", захват объекта "карандаш", покраска детали и шлифовка поверхности. Разработанная система показывает, что современные технологии, в том числе методов машинного обучения, помогают решать сложные технологические операции с высоким уровнем производительности.

**Ключевые слова:** робот манипулятор, киберфизические системы, захват объектов, компьютерное зрение **Цитирование:** Мостаков Н.А Система поддержки обучения манипуляционных роботизированных комплексов для технологических операций / Н.А. Мостаков, А.А. Захарова // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. — № 4(40). — C.17-25. — DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.002.

**Введение.** В работе будут рассмотрены различные варианты использования манипуляционных роботизированных комплексов (МРК), начиная с уже классических задач по движению по точным координатам с использованием систем технического зрения, и заканчивая управлением при помощи нейросети архитектуры Action Chunking with Transformers (ACT), также будет представлена система обучения манипуляционных роботов с использованием нейросети АСТ для промышленных задач. АСТ – это архитектура нейросети, используемая в робототехнике для обучения манипуляционных роботизированных комплексов сложным технологическим операциям. Она основана на трансформерах и позволяет МРК предсказывать последовательности действий на несколько временных шагов вперед.

МРК становятся всё более востребованными по нескольким ключевым причинам. МРК могут работать без перерывов, в отличие от людей, что значительно увеличивает скорость выполнения процессов окраски и захвата [1]. Это особенно важно в массовом производстве, где требуется высокая частота выполнения однотипных операций. Роботы обеспечивают точность и стабильность в выполнении задач [2, 3].

Роботы часто работают в сложных, динамичных и агрессивных средах, и для успешной навигации или выполнения задач им необходимо уметь принимать решения, основываясь на последовательности действий или событий. Использование АСТ позволяет моделям эффективно «запоминать» предыдущие шаги и использовать эту информацию для принятия решений в будущем, что особенно важно в робототехнике.

Преимущество трансформеров в том, что они могут обрабатывать данные, приходящие в виде временных рядов, что идеально подходит для задач, таких, как восприятие окружающего мира роботом и его взаимодействие с этим миром.

МРК используют различные методы и датчики для восприятия окружения [4], что позволяет им эффективно взаимодействовать с объектами и выполнять операции, такие, как захват [5], окраска или сборка продукции.

Существующие решения. Существуют несколько подходов к решению задач с использованием МРК. Наиболее классический подход — это задание человеком-оператором управляющих программ для МРК с заранее известными параметрами. Такой подход используется во всех сферах промышленности, где можно обеспечить неизменность технологического процесса [6]. Данный подход хорошо изучен и описан во многих научных работах [7]. Преимуществом такого подхода является высокая робастность системы, что позволяет обеспечить хорошее качество и высокую производительность в крупно-серийных производствах. Недостатком такого подхода является необходимость переналадки манипуляционного РТК, даже, при небольшом изменении технологического процесса или окружения.

Следующим этапом развития является интеграция элементов технического зрения в роботизированную ячейку [8]. Такой подход значительно повысил вариативность применения МРК. В используемых системах технического зрения (СТЗ), таковое использовалось в связке с различными классическими алгоритмами, такими, как блок-детектор и распознавание линий [9], также СТЗ активно использует наработки в области машинного обучения [10]. Пример использования систем технического зрения также представлен в работе [11] и на рисунке 1. Рисунок 1 демонстрирует классический подход по определению местоположения объекта на основе алгоритма Iterative Closest Point (ICP).

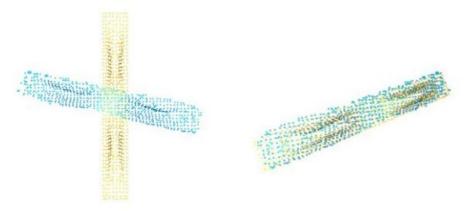


Рис. 1. Метод оценки местоположения детали при помощи ІСР алгоритма

Еще одним вариантом управления MPK является режим телеуправления [12], который используется в медицине (хирургические операции, реабилитация), космических исследованиях (управление аппаратами на орбите) и ликвидации последствий аварий (разбор завалов, обезвреживание опасных веществ). Телеуправление позволяет оператору контролировать MPK на расстоянии, что особенно полезно в условиях, где присутствие человека невозможно или опасно.

Следующий этап развития — это полная интеграция MPK, CT3 и других датчиков в одну систему при помощи мультимодальных нейросетей. Такие системы используются в задачах, требующих точности и визуальной обратной связи, что позволяет системе адаптироваться к изменениям в технологическом процессе и окружении. В работе нейросеть архитектуры ACT предсказывает целевые положения для следующих k временных шагов системы. Данный подход называется метод Action Chunking with Transformers (ACT) [4]. Данная работа представляет новый подход в обучении робототехнических систем сложным технологическим операциям. Недостатком обучения, представленного в статье, является наличие «теневого

клона» для обучения, этот подход не работает с промышленными роботами и большими коллаборативными роботами.

Предложенная в работе архитектура системы позволяет обучать МРК без использования ведущий копии, а также избежать столкновений, благодаря модулю симуляции. Дополненная структура АСТ позволяет системе лучше обобщать полученные данные, что повышает локальную точность траектории во время выполнения технологической операции.

**Структура АСТ.** В ранее опубликованной статье [14] было представлено бимодальное управление (рис. 2), такой подход работает в случае с небольшими роботами, но не эффективен для применения в промышленных системах.

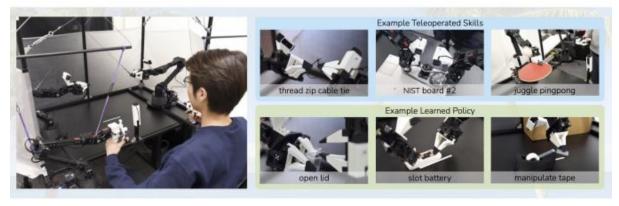


Рис. 2. Обучение сервисного робота [14]

Разработанная и предлагаемая система подходит для промышленных роботизированных систем из-за возможности обучения робота без использования «двойника». Также неоспоримым преимуществом данной системы является возможность использовать на любых МРК с протоколами связи Ethercat и CAN.

Архитектура системы построена на основе архитектуры трансформера, которая использует изображения с камеры робота вместе с описаниями задач, выраженными на естественном языке, в качестве входных данных и напрямую выводит токенизированные действия. Операция "токенизация" — это процесс преобразования последовательности состояния МРК и данных с сенсоров в дискретные элементы (токены), которые модель может эффективно обрабатывать. Использование операции токенизации вводится в работе [17].

Токенизация изображений: изображения (RGB формат) подаются через модель CNN (ResNet) для извлечения пространственных признаков 300х512.

Токенизация действий: измерения действий робота — это 7 переменных, описывающих MPK (6 положений joint в радианах, 1 параметр, отвечающий за состояние захвата, которое имеет дискретное значение).

Алгоритм обучения выглядит следующим образом:

- 1. Инициализация параметров
  - а. Датасет (6 положений joint в радианах, 1 параметр состояние рабочего инструмента, изображение с камер).
  - b. Выбор размерности длины последовательности действий для прогнозирования K и выбор гиперпараметра b.
  - с. Определение переменных (действие на одном шаге времени, наблюдение на шаге, наблюдение без изображений).
- 2. Создание модели
  - а. Инициализация энкодера  $q(z \lor a_{t:t+k}, \sigma_t)$ . Кодирует последовательность действией и наблюдения в пространстве z.

- b. Инициализация декодера ( $\pi_0 | \sigma_t$ , z). Декодирует наблюдение и пространство z в последовательность действий.
- 3. Цикл обучения
  - а. Из датасета выбираются случайное наблюдение и последовательность действий.
  - b. Кодирование последовательности  $a_t$  в пространство z и декодирование z в  $a_t$ .
  - с. Расчет функции потерь L= Lpek, где Lpek MSE между предсказанным  $a_t$  и истинными  $a_t$ .
  - d. Обновление параметров энкодера и декодера.

После обучения модели предлагается следующий алгоритм по ее применению:

- 1. На вход алгоритма подаются: обученная модель  $\pi_0$ , T максимальное количество шагов в эпизоде.
- 2. Создается очередь для хранения предсказанных действий для шага t.
- 3. Предсказание действий  $a_{t:t+k}$ , с помощью модели  $(\pi_0|\sigma_t,z)$
- 4. Добавление предсказанного действия в буфер B[t+i]
- 5. Извлечение из буфера B всех действий, предсказанных для шага t вычисления итогового действия:

$$a_t = rac{\sum_i w_i \cdot A_t}{\sum_i w_i}$$
, где  $w_i = e^{-mi}$ .

**Информационная модель системы.** Для сбора данных и управления МТК необходимо предложить способ передачи команд от человека-оператора системе, классические способы управления через задания последовательности точек не подходят для этой операции. Для решения этой проблемы было предложено использовать устройство на базе НТС VIVE (рис. 3). HTC VIVE – это устройство для высокоточного отслеживания положения и ориентации (6 степеней свободы – 6DoF). Высокая точность достигается за счет использования внешних базовых станций (Lighthouse), которые излучают инфракрасные лазеры. Фотодатчики на контроллере регистрируют лазеры, позволяя системе с высокой точностью определять положение в реальном времени.



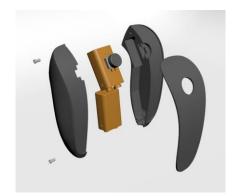


Рис. 3. Разработанное устройство для записи движений на базе устройства HTC VIVE

К сожалению, в источнике [15] приводится ряд выводов, что для данного датчика характерны выбросы и изменение показаний с течением времени. Часть таких проблем решается правильно подобранными фильтрами, но даже такие фильтры не спасут от коллизии МТК. Для решения этой проблемы предлагается использовать модуль симуляции, который позволит предотвратить коллизию, если во время работы модуля симуляции возникла коллизия, данные на реальный МТК передаваться не будут, что позволит уберечь устройство от поломки. Общая архитектура системы представлена на рис. 4. Архитектура системы состоит из 4 основных частей: Блок сбора данных, Модуль симуляции, Манипулятор, Блок хранения и обработки. Из модуля записи движений на выход подается местоположение и ориентация (кватернион) модуля записи движений (x, y, z, q1, q2, q3, q4). Эти данные подаются

в симуляцию, где происходит проверка на корректность выполнения команды "расчет достижимости" и коллизий. Далее проверенные данные переводятся в углы суставов МТК и передаются на реальный МТК с частотой 1 КГц. С реального МТК также снимаются углы суставов и передаются в Блок хранения и обработки.

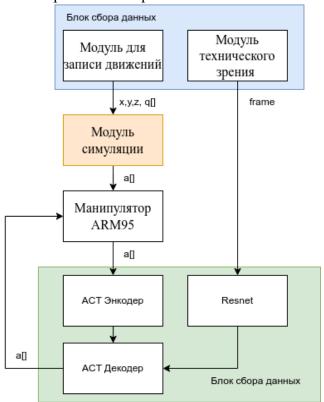


Рис. 4. Информационная модель системы

Научной новизной предложенного решения является возможность адаптировать робототехнические системы под наиболее популярные операции в манипуляционной робототехнике, не прибегая к программированию системы, оператору необходимо записать около 100 эпизодов в режиме телеуправления для возможности обучения системы.

Экспериментальная часть. Для проверки работоспособности алгоритма был проведен ряд экспериментов с наиболее популярными задачами для манипуляционной робототехники. Для каждого эксперимента был записан ряд эпизодов. Каждый эпизод занимает 8-14 секунд для человека-оператора при выполнении действий в зависимости от сложности операции, что соответствует 400-700 временным шагам при частоте управления 50 Гц. Были записаны около 50 демонстраций для каждой операции. Таким образом, общее количество для демонстраций составляет около 10-20 минут данных для каждой операции. На рисунке 5 показан процесс обучения системы в задаче захвата объектов.



Рис. 5. Снимок процесса сбора данных

**Дизайн-эксперимент.** Для тестирования и проверки работы предложенного алгоритма предполагается использовать следующие метрики:

- Соотношение успешных действий и общего числа действий (%). Действие считается успешным, если МТК корректно выполнил операцию, ограничений по времени нет.
- Соотношение времени действия при автоматическом выполнении и среднего времени выполнения действия человеком  $t_{\rm abt}-t_{\rm ten}$ .
- Локальная точность траектории во время выполнения действия (мм). Эта метрика описывает отклонение траектории во время автономного режима от средней траектории во время записи операции.

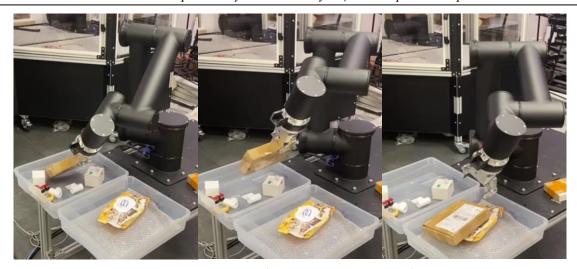
В ходе проведения эксперимента было использовано следующее специализированное оборудование: камера глубины Azure Kinect, манипуляционный робот ARM-IMR-95, вебкамера и устройство для записи движений на базе устройства HTC VIVE. Для реализации телеуправления MTK использовался режим прямого контроля, позволяющий оператору выполнять операции в реальном времени.

Эксперимент состоял из нескольких этапов. На подготовительном этапе осуществлялась установка баз и калибровка модуля записи движений. В процессе записи данных фиксировались семь параметров МТК: угловые координаты шести сочленений (в радианах) и дискретный статус захвата. Также производилась запись RGB-изображений с двух камер, что обеспечило мультимодальный характер обучающего датасета. После записи более 50 эпизодов для каждой операции проводилось обучение нейросетевой модели на основе алгоритма, описанного выше, для записи использовались несколько типов технологических операций. Далее выполнялось тестирование системы в автономном режиме.



Рис. 6. Технологическая операция покраска детали

Результаты эксперимента продемонстрировали высокую эффективность системы в операциях захвата и транспортировки объектов, однако в операциях со сложным движением наблюдается снижение точности выполнения операций. Важным аспектом исследования стала демонстрация устойчивости алгоритма к стохастическим вариациям входных данных, обусловленным антропоморфным характером операторских действий в ходе обучения. Полученные данные свидетельствуют о перспективности применения комбинированного подхода, сочетающего телеуправление и машинное обучение, для создания адаптивных робототехнических систем (рис. 7). В ходе проведения эксперимента также был замечен недостаток выбранного оборудования. Устройство для записи движений на базе устройства НТС VIVE требует установки дополнительных датчиков определения местоположения в рабочей зоне, что значительно усложняет применение такого устройства на реальном производстве. Альтернативой модулю записи движений в дальнейшем предполагается использовать 6-осевое устройство, кинематически копирующее манипуляционный робот ARM-IMR-95 в уменьшенном масштабе.



**Рис. 7.** Автоматический захват коробки и перемещение объекта в другой поддон В таблице 1 приведены типы технологических операций и оценена успешность действий.

Таблица 1. Типы технологических операций

Наименование технологической операции	Успешные действия, %	$t_{ m abt} - t_{ m TeJ}$ , сек	Локальная точность траектории, мм
Захват объекта (коробка)	98%	8	11
Захват объекта (карандаш)	93%	9	18
Покраска детали	70%	2	24
Шлифовка поверхности	72%	5	19

Заключение. Разработанная система управления роботизированными комплексами позволяет повысить адаптивность роботизированных комплексов за счет наличия возможности быстрого обучения системы новым навыкам, не требующего от оператора специальной квалификации. Использование телеуправления и АСТ-архитектуры позволяет обучать МТК сложным составным действиям в недетерминированных средах, с вероятностью успеха 60-90%. Разработанная и представленная в статье система позволяет значительно внедрения роботизированных увеличить скорость комплексов на отечественных производствах. Система была обучена для 4 различных операций, для каждой операции были записаны в среднем около 50 эпизодов, каждый длительностью около 8-14 секунд. Такого количества данных достаточно для успешного выполнения задач с вероятностью более 70%. Показатели по метрикам: время выполнения операции и локальная точность траектории – показывают возможность внедрения данной системы на реальных производствах. К недостаткам разработанного решения можно отнести тот факт, что используется метод имитационного обучения, для данного метода характерны недостатки в части того, что метод может не превзойти производительность демонстраций. Еще одним недостатком является ограничение на обобщения новых инструкций комбинациями ранее увиденных.

Для развития системы планируется добавить RL-обучение для минимизации количества данных, необходимых для обучения. Также сейчас разработана VLA-модель, но от оператора все еще требуется задавать правильный порядок действий, в дальнейшем планируется добавить верхнеуровневую сеть VLM, которая будет создавать цепочку действий для VLA модели, что позволит устранить указанные выше недостатки и повысить производительность системы и степень автономности ее работы.

#### Список источников

- 1. Ji W., Wang L. Industrial robotic machining: a review. The international journal of advanced manufacturing technology, 2019, vol. 103, pp. 1239–1255.
- 2. Zhang Y., Li X., Wang J. A Review of paint robots: technologies, applications, and challenges. International Journal of advanced robotic systems, 2020, vol. 17, no. 4.
- 3. Kingsley K., Stanley O. Design of robotic manipulator for painting purposes in automotive industry. Global Journal of engineering and technology advances, 2022, vol. 13, no. 2, pp. 054–059.
- 4. Vaswani A., Shazeer N.M., Parmar N., et al. Attention is all you need. Advances in neural information processing systems, 2017, vol. 30, pp. 5998-6008.
- 5. Bicchi A., Kumar V. Robotic Grasping and Manipulation. In: Siciliano B., Valavanis K.P. (eds) Control Problems in Robotics and Automation, Lecture notes in control and information sciences, 1998, vol. 230. Springer, London. DOI: 10.1007/BFb0015076.
- 6. Karabegović I. The Role of industrial robots in the development of automotive industry in China. Journal of Intelligent Manufacturing, 2016, vol. 27, pp. 1-12.
- 7. Беклемишев Н.Д. Алгоритмы управления движением схвата манипулятора. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2017. 47 с.
- 8. Inish T., Shaan U. Integration of vision system onto robotic arm. International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science (IRJMETS), 2024.
- 9. Kaur U., Narula R. Vision-based control of robotic manipulator. Journal of Advanced Research in Automotive Engineering (JAAE), 2016, pp. 205-212.
- 10. Quillen D., Jang E., Nachum O. Deep Reinforcement Learning for Vision-Based Robotic Grasping: A Simulated Comparative Evaluation of Off-Policy Methods. Machines, 2023, pp. 11-16.
- 11. Захарова А.А. Автоматизация процесса покраски металлических деталей со сложной геометрической формой / А.А. Захарова, Н.А. Мостаков, А.О. Винокуров // Материалы Международной конференции молодых ученых [МКПУ-2023]. 2023.
- 12. Wu P., Shentu Y. GELLO: A General, Low-Cost, and Intuitive Teleoperation Framework for Robot Manipulators. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2024.
- 13. Lai L., Huang A.Z., Gershman S.J. Action chunking as policy compression. 2022. DOI: 10.31234/osf.io/z8yrv\_v2.
- 14. Zhao T.Z., Kumar V., Levine S., Finn C. Learning Fine-Grained Bimanual Manipulation with Low-Cost Hardware. Robotics: Science and Systems (RSS), 2023, DOI: 10.48550/arXiv.2304.13705.
- 15. Kulozik J., Jarrassé N. Evaluating the precision of the HTC VIVE Ultimate Tracker. 2024, DOI: 0.48550/arXiv.2409.01947.
- 16. Shahria M.T., Sunny M.S.H. A Comprehensive Review of Vision-Based Robotic Applications. Robotics, 2022, DOI: 10.3390/robotics11060139.
- 17. Chau G., An Y., Iqbal A.R. Generalizability Under Sensor Failure: Tokenization + Transformers Enable More Robust Latent Spaces. Computer Science, 2024, DOI: 10.48550/arXiv.2402.18546.

**Захарова Алёна Александровна.** Докт. техн. наук, главный научный сотрудник, лаборатория Киберфизических систем, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. AuthorID: 101862, SPIN: 2683-7199, ORCID: 0000-0003-4221-7710, Researcher ID: F-8209-2017, 117997, Россия, Москва.

**Мостаков Николай Алексеевич.** аспирант, лаборатория Киберфизических систем, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. AuthorID: 1086261, SPIN: 5393-7773, ORCID: 0000-0002-3746-3493, 117997, Россия, Москва.

UDC 004.896

DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.002

#### System for training manipulation RTK for technological operations

#### Nikolay A. Mostakov, Alena A. Zakharova

Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences,

Russia, Moscow, zaawmail@gmail.com

**Abstract.** The article discusses the operation of robotic manipulation systems for the most popular tasks in the industry. The article provides an implementation of classical methods for grasping objects using a CAD model of

the object, highlights their advantages and disadvantages. As a new solution, it is proposed to use a system based on the Action Chunking with Transformers (ACT) neural network architecture. The article details the use of ACT neural networks, the algorithm for training neural networks and launching them within the framework of technological operations of real production. The paper describes the hardware of the system, which includes the ARM95 Collaborative Manipulator, the RealSense Depth Camera D405 depth camera and the HTC VIVE position tracker. The following technological operations were considered as an experimental part of the work: grasping a box object, grasping a pencil object, painting a part and grinding a surface. The developed system shows that modern technologies, including machine learning methods, help to solve complex technological operations with a high level of productivity.

Keywords: robot manipulator, cyber-physical systems, grasping objects, computer vision

#### References

- 1. Ji W., Wang L. Industrial robotic machining: a review. The international journal of advanced manufacturing technology, 2019, vol. 103, pp. 1239–1255.
- 2. Zhang Y., Li X., Wang J. A Review of paint robots: technologies, applications, and challenges. International Journal of advanced robotic systems, 2020, vol. 17, no. 4.
- 3. Kingsley K., Stanley O. Design of robotic manipulator for painting purposes in automotive industry. Global Journal of engineering and technology advances, 2022, vol. 13, no. 2, pp. 054–059.
- 4. Vaswani A., Shazeer N.M., Parmar N., et al. Attention is all you need. Advances in neural information processing systems, 2017, vol. 30, pp. 5998-6008.
- 5. Bicchi A., Kumar V. Robotic Grasping and Manipulation. In: Siciliano B., Valavanis K.P. (eds) Control Problems in Robotics and Automation, Lecture notes in control and information sciences, 1998, vol. 230. Springer, London. DOI: 10.1007/BFb0015076.
- 6. Karabegović I. The Role of industrial robots in the development of automotive industry in China. Journal of Intelligent Manufacturing, 2016, vol. 27, pp. 1-12.
- 7. Beklemishev N.D. Algoritmy upravleniya dvizheniem skhvata manipulyatora [Algorithms for controlling the movement of a manipulator gripper]. Moscow, IPM im. M.V. Keldysha [Keldysh Institute of Applied Mathematics] Publ., 2017, 47 p.
- 8. Inish T., Shaan U. Integration of vision system onto robotic arm. International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science (IRJMETS), 2024.
- 9. Kaur U., Narula R. Vision-based control of robotic manipulator. Journal of Advanced Research in Automotive Engineering (JAAE), 2016, pp. 205-212.
- 10. Quillen D., Jang E., Nachum O. Deep Reinforcement Learning for Vision-Based Robotic Grasping: A Simulated Comparative Evaluation of Off-Policy Methods. Machines, 2023, pp. 11-16.
- 11. Zakharova A.A., Mostakov N.A., Vinokurov A.O. Avtomatizatsiya protsessa pokraski metallicheskikh detaley so slozhnoy geometricheskoy formoy [Automation of the painting process for metal parts with complex geometric shapes]. Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii molodykh uchenykh [Proceedings of the International Conference of Young Scientists (MKPU-2023)], 2023.
- 12. Wu P., Shentu Y. GELLO: A General, Low-Cost, and Intuitive Teleoperation Framework for Robot Manipulators. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2024.
- 13. Lai L., Huang A.Z., Gershman S.J. Action chunking as policy compression. 2022. DOI: 10.31234/osf.io/z8yrv\_v2.
- 14. Zhao T.Z., Kumar V., Levine S., Finn C. Learning Fine-Grained Bimanual Manipulation with Low-Cost Hardware. Robotics: Science and Systems (RSS), 2023, DOI: 10.48550/arXiv.2304.13705.
- 15. Kulozik J., Jarrassé N. Evaluating the precision of the HTC VIVE Ultimate Tracker. 2024, DOI: 0.48550/arXiv.2409.01947.
- 16. Shahria M.T., Sunny M.S.H. A Comprehensive Review of Vision-Based Robotic Applications. Robotics, 2022, DOI: 10.3390/robotics11060139.
- 17. Chau G., An Y., Iqbal A.R. Generalizability Under Sensor Failure: Tokenization + Transformers Enable More Robust Latent Spaces. Computer Science, 2024, DOI: 10.48550/arXiv.2402.18546.

Zakharova Alena Alexandrovna. Dr. Sci. (Tech.), chief Scientific Officer, Laboratory of Cybernetic Systems, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS. AuthorID: 101862, SPIN: 2683-7199, ORCID: 0000-0003-4221-7710, Researcher ID: F-8209-2017, Moscow, Russia.

Mostakov Nikolay Alexeyevich. graduate student, Laboratory of Cybernetic Systems, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS. AuthorID: 1086261, SPIN: 5393-7773, ORCID: 0000-0002-3746-3493, Moscow, Russia. Статья поступила в редакцию 06.08.2025; одобрена после рецензирования 01.10.2025; принята к публикации 03.10.2025.

The article was submitted 08/06/2025; approved after reviewing 10/01/2025; accepted for publication 10/03/2025

УДК 004.8

DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.003

# Диагностирование и прогнозирование состояний технических и технологических объектов на основе ансамблевых технологий машинного обучения

#### Ломакина Любовь Сергеевна, Двитовская Алиса Николаевна, Корелин Кирилл Александрович

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Россия, Нижний Новгород, *avd.alisa@gmail.com* 

Аннотация. В статье исследуется применение ансамблевых методов машинного обучения для диагностики и прогнозирования состояний технических и технологических объектов в условиях зашумленных данных, нелинейных зависимостей и высокой размерности признакового пространства. Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения надежности промышленных систем за счет минимизации аварийных рисков и оптимизации эксплуатационных процессов. Традиционные подходы демонстрируют недостаточную точность в сложных сценариях, что мотивирует использование ансамблевых технологий, объединяющих прогнозы множества моделей для достижения устойчивых результатов. Основное внимание уделено методам Бэггинг, Бустинг и Стекинг, их математическому обоснованию и практической реализации. Проведен эксперимент с ансамблем на основе сверточных нейронных сетей (CNN) для классификации дефектов микроструктуры металла. Результаты показали рост точности прогнозирования при увеличении числа классов по сравнению с одиночной моделью, что подтверждает эффективность ансамблей в снижении дисперсии ошибок и коррекции смещения моделей. Предложенный подход демонстрирует потенциал для внедрения в промышленные системы, повышая надежность диагностики и безопасность эксплуатации сложных технических систем.

**Ключевые слова:** диагностика технических объектов, прогнозирование состояний, ансамблевые методы, бэггинг, бустинг, стекинг, сверточные нейронные сети

**Цитирование:** Ломакина Л.С. Диагностирование и прогнозирование состояний технических и технологических объектов на основе ансамблевых технологий машинного обучения / Л.С. Ломакина, А.Н. Двитовская, К.А. Корелин // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. - N = 4(40). - C.26-37. - DOI: 10.25729/ESI.2025.40.4.003.

**Введение.** Современные промышленные системы требуют надежных методов диагностики состояний технических объектов для предотвращения аварийных ситуаций и оптимизации процессов эксплуатации. Рост числа датчиков, генерирующих огромные объемы данных в режиме реального времени, а также необходимость прогнозирования редких, но катастрофических отказов, обусловливают потребность в переходе к интеллектуальным решениям.

Однако традиционные методы интеллектуального анализа данных зачастую демонстрируют недостаточную точность в условиях зашумленных данных, нелинейных зависимостей и высокой размерности признакового пространства.

В подобных ситуациях ансамблевые модели машинного обучения, объединяющие предсказания нескольких базовых алгоритмов, позволяют достичь более высокой точности и устойчивости по сравнению с одиночными моделями.

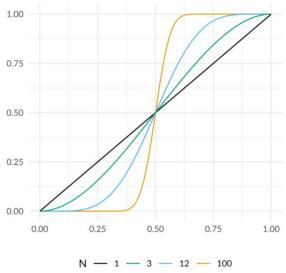
Вклад работы в развитие научной области заключается в исследовании эффективности применения ансамблевых методов машинного обучения для диагностирования и прогнозирования состояний объектов.

В статье рассматриваются принципы работы ансамблевых моделей машинного обучения, основное внимание уделено методам Бэггинга (Bagging), Бустинга (Boosting) и Стекинга (Stacking).

1. Основы ансамблевых методов машинного обучения. Ансамблевые методы машинного обучения [1] — это подход, при котором решения множества моделей объединяются для повышения общей точности и надежности итогового результата.

Основная цель ансамблевых методов — минимизировать риски переобучения, снизить влияние случайных ошибок и повысить устойчивость алгоритмов к зашумленным данным или выбросам. Ключевая идея ансамблевых методов заключается в том, что коллективное решение группы моделей превосходит предсказание отдельного алгоритма, если выполняются условия независимости ошибок и их диверсификации.

Математическое обоснование этой идеи заключено в теореме Кондорсе о жюри присяжных [2]. Эта теорема утверждает, что если каждый член жюри присяжных обладает независимым мнением по поводу рассматриваемой ситуации, и если вероятность того, что любой из них принимает правильное решение, больше 0,5, то вероятность того, что решение присяжных в целом окажется правильным, возрастает с увеличением количества членов жюри и стремится к 1. Если же вероятность быть правым у каждого из членов жюри меньше 0,5, то вероятность принятия правильного решения присяжными в целом уменьшается и стремится к 0 с увеличением количества присяжных. Теорема Кондорсе о жюри присяжных иллюстрируется рисунком 1.



**Рис. 1.** График вероятностей успеха по теореме Кондорсе с параметрами по оси Y – общая вероятность успеха, по оси X – вероятность успеха члена жюри, N – кол-во членов жюри

На основании этой теоремы мы можем сделать вывод, что, имея несколько моделей с вероятностью успешного и независимого прогноза больше 0,5, можно объединить их результаты и тем самым достичь большей точности прогноза [3].

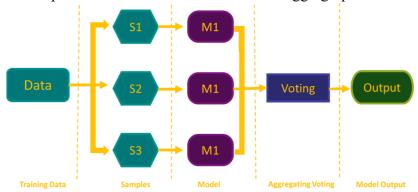
Еще одним математическим обоснованием идеи ансамблевых методов является неравенство Хёфдинга [4]. Согласно этому неравенству, при увеличении числа независимых моделей в ансамбле вероятность ошибочного прогноза уменьшается (экспоненциально для бинарной классификации), при условии, что все модели независимы, и каждая модель имеет вероятность ошибки меньше 0,5.

Однако стоит отметить, что на практике идеальная независимость недостижима: модели часто обучаются на пересекающихся данных или используют схожие алгоритмы, что ослабляет эффективность использования ансамблевых методов.

#### 2. Основные типы ансамблей (Бэггинг, Бустинг, Стекинг)

**2.1. Бэггинг (Bootstrap Aggregating).** Бэггинг (Bootstrap Aggregating) [5] – метод ансамблирования, предложенный Лео Брейманом в 1996 году. Цель бэггинга – повышение

стабильности и точности моделей машинного обучения за счёт объединения прогнозов множества базовых алгоритмов, обученных на различных подвыборках исходных данных. Основная идея заключается в создании разнообразия моделей через бутстрэпвыборки (случайное извлечение объектов с возвращением), что позволяет компенсировать ошибки отдельных алгоритмов. Схема метода ансамбля Bagging представлена на рисунке 2.



Puc. 2. Схема метода ансамбля Bagging

#### Основные этапы бэггинга:

- 1. Создание бутстрэп-выборок (Bootstrap Sampling). Из исходного обучающего набора данных случайным образом формируется несколько подвыборок с возвращением. Это означает, что каждая подвыборка имеет тот же размер, что и исходные данные (если размер исходного набора данных достаточно велик, иначе выбирается меньший размер относительной исходной выборки), а также некоторые объекты попадают в подвыборку несколько раз, а некоторые не попадают вообще.
- 2. Обучение базовых моделей. На каждой бутстрэп-выборке обучается отдельная модель. Чаще всего используются нестабильные модели, то есть их прогнозы сильно зависят от данных. Например, глубокие деревья решений или нейронные сети, что склонны к переобучению.
- 3. Агрегация прогнозов (Aggregation). Для агрегации в моделях бэггинга применяются два основных метода: голосование большинства, когда итоговый ответ выбирается как наиболее часто встречающийся класс среди прогнозов базовых моделей и усреднение, когда результатом становится среднее арифметическое предсказанных значений всех моделей.

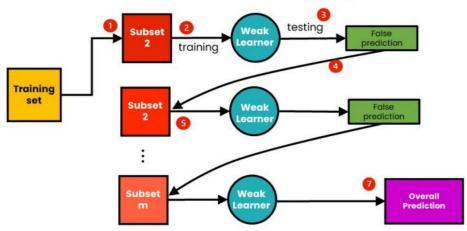
Разновидности методов на основе бэггинга в основном отличаются друг от друга тем, как они формируют случайные подмножества обучающего набора:

- Pasting [6] если случайные подмножества набора данных формируются, как случайные подмножества выборок.
- Random Subspaces [7] если случайные подмножества набора данных формируются, как случайные подмножества признаков.
- Random Patches [8] если базовые модели строятся на подмножествах как выборок, так и признаков.
  - Эффективность бэггинга объясняется двумя обстоятельствами:
- Компенсация ошибок: различия в обучающих подвыборках приводят к тому, что ошибки одних моделей нейтрализуются другими при агрегации.
- Работа с выбросами: выбросы могут не попадать в некоторые выборки, что повышает точность отдельных моделей.

На основании рассмотренных данных мы можем выделить основные преимущества метода бэггинг, а именно, снижение дисперсии, что актуально для моделей с высокой дисперсией (например, глубокие деревья), и параллелизм, так как обучение базовых моделей независимо, что ускоряет процесс (важно для нейросетей). Так же стоит отметить универсальность данного метода, однако, хоть он и применим к любым алгоритмам, но

максимальная эффективность достигается с сильными моделями (в отличие от бустинга, ориентированного на слабые модели).

**2.2. Бустинг (Boosting).** Бустинг [9] – это метод машинного обучения, основанный на ансамблирования, где несколько моделей, часто называемых "слабыми классификаторами", объединяются в единую сильную модель. В отличие от других ансамблевых подходов, таких как бэггинг, в бустинге модели обучаются последовательно, а не параллельно. Каждая последующая модель фокусируется на исправлении ошибок, предыдущими моделями. достигается Это за счёт динамического перераспределения весов объектов в обучающем наборе: экземпляры, которые были неправильно классифицированы, получают больший вес, заставляя новые модели "концентрироваться" на сложных случаях. Схема метода ансамбля Boosting представлена на рисунке 3.



**Рис. 3.** Схема метода ансамбля Boosting

Стоит выделить две основные разновидности бустинга:

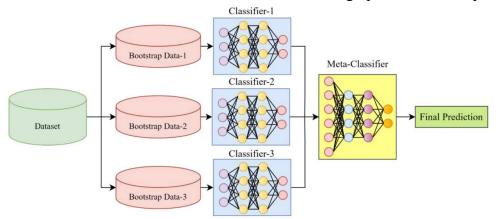
- Gradient Boosting [10]: Использует градиентный спуск для минимизации функции потерь. Каждая новая модель обучается на градиенте ошибки предыдущей. Популярные реализации: XGBoost, LightGBM, CatBoost.
- AdaBoost (Adaptive Boosting) [11]: Динамически изменяет веса объектов, увеличивая значимость ошибочно классифицированных экземпляров.

Главным преимуществом бустинга по сравнению с другими ансамблевыми моделями является уменьшение смещения. Бустинг эффективно снижает систематическую ошибку ансамбля, так как каждая новая модель корректирует недостатки предыдущих. Базовые алгоритмы часто выбираются с высоким смещением (например, неглубокие деревья), что позволяет компенсировать их слабость через последовательное обучение.

В тоже время важным недостатком бустинга является склонность к переобучению, особенно если ансамбль содержит слишком большое количество моделей или высокую скорость обучения. Поэтому данный метод сильно зависит от настройки гиперпараметров. Ключевые параметры, такие, как количество моделей, скорость обучения, требуют тщательного подбора. Так же стоит отметить, что обучение происходит последовательно, что исключает распараллеливание и увеличивает время работы.

**2.3.** Стекинг (Stacking). Стекинг [12] — это продвинутый метод ансамблирования машинного обучения, который комбинирует прогнозы нескольких разнородных моделей (базовых моделей) на уровне метамодели. Основная идея заключается в использовании предсказаний базовых алгоритмов в качестве входных данных для метамодели, которая обучается на этих данных, чтобы синтезировать итоговый прогноз с повышенной точностью.

В отличие от бэггинга и бустинга, где решения усредняются или взвешиваются, стекинг предполагает более гибкую стратегию, где метамодель "учится" оптимально объединять результаты базовых моделей. Схема метода ансамбля Stacking представлена на рисунке 4.



Puc. 4. Схема метода ансамбля Stacking

Среди основных преимуществ стекинга стоит выделить гибкость и разнообразие моделей, так как стекинг позволяет комбинировать модели с разными алгоритмическими подходами, что увеличивает разнообразие ансамбля. Это разнообразие помогает уловить сложные паттерны данных, которые могут быть не доступны отдельным моделям. Стекинг так же позволяет повысить точность модели за счет агрегации прогнозов через метамодель, поэтому стекинг часто превосходит по точности отдельные базовые модели и даже другие методы ансамблирования. Например, метамодель (обычно простая, как линейная или логистическая регрессия) может устранить смещения или ошибки, характерные для конкретных алгоритмов. Так же стоит отметить адаптивность метамодели. Метаклассификатор не ограничивается простым усреднением — он обучается находить оптимальные веса или нелинейные комбинации прогнозов, что особенно полезно в задачах с неочевидными взаимосвязями между предсказаниями базовых моделей.

Однако стоит выделить и основные недостатки стекинга, такие, как высокая вычислительная стоимость, ведь обучение множества моделей на нескольких уровнях требует значительных ресурсов и времени, что делает стекинг непрактичным для задач с жесткими временными ограничениями, а также риск переобучения, если метамодель слишком сложна или базовые модели имеют высокую корреляцию ошибок, ансамбль может переобучиться. Стоит отметить и сложность настройки, ведь подбор разнородных базовых моделей и метамодели требует глубокого понимания данных и тщательного экспериментирования.

3. Обзор существующих работ, связанных с исследованием ансамблевых методов машинного обучения. Ансамблевые методы машинного обучения активно исследуются в последние десятилетия, и значительное количество научных работ посвящено разработке и улучшению алгоритмов бэггинга, бустинга и стекинга, а также их комбинаций. Ниже представлен анализ некоторых из множества исследований, направленных на решение задачи повышения точности и надежности предсказаний с помощью ансамблевых подходов.

Статья "A survey of multiple classifier systems as hybrid systems", опубликованная в журнале Information Fusion в 2014 году, написана авторами Michał Woźniak, Manuel Graña и Emilio Corchado [13]. Целью работы стало проведение систематического обзора так называемых многоуровневых классификаторов (multiple classifier systems – MCS), которые также могут рассматриваться, как гибридные системы машинного обучения. Авторы подробно рассматривают различные типы ансамблевых и гибридных моделей машинного

обучения, классифицируя их по архитектуре, способу комбинирования и используемым алгоритмам. На основе проведенного анализа авторы делают следующие важные выводы:

- Ансамблевые методы значительно превосходят отдельные модели по метрикам точности и устойчивости к переобучению.
- Разнообразие моделей в ансамбле играет ключевую роль: чем выше диверсификация ошибок, тем выше вероятность корректного коллективного решения.
- Современные гибридные подходы позволяют объединять преимущества разных алгоритмов, что особенно важно при работе со сложными или зашумленными данными.
- Вычислительная сложность остаётся одним из главных ограничений ансамблевых систем, особенно при использовании больших моделей и глубоких сетей.
- Практическая применимость ансамблевых методов продемонстрирована в таких областях, как медицина, финансовый анализ, компьютерное зрение и распознавание речи.

В работе «CatBoost: unbiased boosting with categorical features» авторов Prokhorenkova, L., Gusev, G., Vorobev, A., Dorogush, A. V., Gulin, A. (NeurIPS 2018) [14] представлен алгоритм CatBoost — реализация градиентного бустинга, разработанная специально для эффективной обработки категориальных признаков без предварительного кодирования. Авторы предлагают метод, позволяющий напрямую использовать категориальные переменные в процессе обучения деревьев решений, что делает CatBoost особенно полезным в задачах, где данные содержат большое количество нечисловых факторов. Статья включает описание архитектуры CatBoost, сравнение производительности с другими популярными реализациями бустинга (XGBoost, LightGBM), а также серию экспериментов на реальных и синтетических данных. CatBoost показал лучшие результаты по точности по сравнению с XGBoost и LightGBM и меньшую склонность к переобучению. Особенно заметное преимущество наблюдалось на наборах с большим количеством категориальных признаков. На наборах без категориальных признаков CatBoost показал сравнимую или немного худшую скорость обучения, чем LightGBM, но качество предсказания оставалось конкурентоспособным.

В работе Sagi & Rokach (2018) [15] рассматриваются различные стратегии построения ансамблей, включая стекинг, и выделяются ключевые факторы, влияющие на их эффективность: разнообразие базовых моделей, корректность их прогнозов и способ комбинирования. Авторы также акцентируют внимание на том, что успех стекинга напрямую зависит от качества мета-обучения, которое может быть выполнено с использованием линейной регрессии, SVM, деревьев решений и других алгоритмов.

4. Описание эксперимента и пример практической реализации ансамблевого подхода. Был разработан ансамблевый подход, используя метод бэггинга, на основе сверточных нейронных сетей (CNN) и применен для классификации дефектов микроструктуры металла. Поскольку метод Boosting из-за последовательного обучения на ошибках, допущенных предыдущей моделью, не предоставляет возможность запуска параллельного обучения моделей, а метод Stacking требует времени и большой вычислительной мощности для обучения моделей на нескольких уровнях, то для реализации ансамбля нейросетей был выбран метод Bagging. Данный метод позволит реализовать параллельное обучение моделей и не потребует такого количества ресурсов, как Stacking.

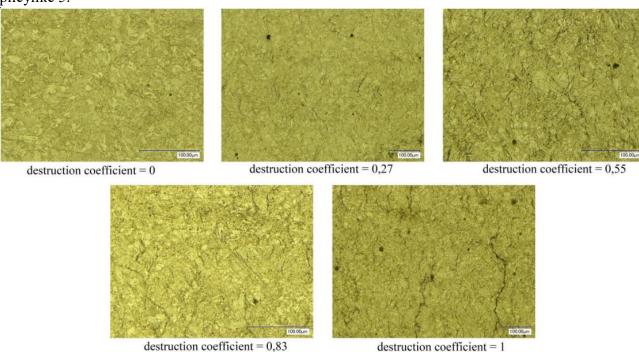
В рамках исследования использовался специализированный набор данных, который включает изображения микроструктуры металла с пятью классами, соответствующими степени разрушения (0 – исправное состояние, 1 – разрушение). Исходные данные содержат

100 изображений размером 1600×1200 пикселей. При количестве данных для обучения в размере сотни или нескольких сотен из каждого класса, который необходимо распознать, будет велика вероятность переобучения модели. Такого количества данных может оказаться мало для такой не простой задачи, как классификация. В этом случае модель может показывать высокий процент точности на примерах из обучающих данных и низкий на этапе тестирования на новых данных.

Это сложная, но реалистичная проблема в области машинного обучения, поскольку сбор даже небольшого количества данных может оказаться чрезвычайно дорогим или трудоемким, как, например, в случае данной исследовательской работы — это невозможность автоматизации сбора данных. Специалист вручную производит срез металла и делает фотографию на оборудовании, повторяя процедуру для создания новых образцов. Для извлечения максимальной пользы из небольшого количества данных реализуется механизм дискретизации каждого такого образца размером 1600×1200 пикселей на 9 частей с последующим рядом случайных преобразований полученных «частей» исходного изображения. Подобные преобразования позволят дополнить выборку обучающих примеров так, что модель никогда не увидит дважды один и тот же образец, а также расширить набор обучающих примеров.

Для реализации этих и дальнейших возможностей использовался Keras — это высокоуровневый API, который может использовать функции библиотеки TensorFlow. Класс ImageDataGenerator() позволил создать наборы изображений с искажениями в зависимости от настроенных параметров, а также выполнять нормализацию изображений. ImageDataGenerator предоставляет различные способы искажений изображения — случайные повороты в определенном диапазоне градусов, сдвиг изображения (вправо, влево, вверх и вниз), наклоны изображения и увеличение — эти методы искажений требуют заполнения пикселями образовавшегося после перемещения изображения пустого пространства.

Из полученного датасета тестовая выборка составляет 10% от общего объёма. Классы имеют значения: 0, 0.27, 0.55, 0.83, 1. Образцы изображений каждого класса представлены на рисунке 5.



**Рис. 5.** Образцы изображений микроструктуры образца металла с различной степенью разрушения

В качестве базовой модели ансамбля была реализована сверточная нейронная сеть. Сверточная нейронная сеть была выбрана, как наиболее подходящий инструмент для анализа изображений микроструктур металла благодаря их способности автоматически извлекать пространственные признаки, устойчивости к вариациям данных и возможности эффективного масштабирования через ансамбли.

Структура сверточной нейронной сети представлена на рисунке 6.

Layer (type)	Output Shape	Param #
conv2d (Conv2D)	(None, 128, 128, 16)	448
<pre>max_pooling2d (MaxPooling2D )</pre>	(None, 64, 64, 16)	0
conv2d_1 (Conv2D)	(None, 64, 64, 16)	2320
<pre>max_pooling2d_1 (MaxPooling 2D)</pre>	(None, 32, 32, 16)	0
conv2d_2 (Conv2D)	(None, 32, 32, 32)	4640
<pre>max_pooling2d_2 (MaxPooling 2D)</pre>	(None, 16, 16, 32)	0
conv2d_3 (Conv2D)	(None, 16, 16, 64)	18496
max_pooling2d_3 (MaxPooling 2D)	(None, 8, 8, 64)	0
flatten (Flatten)	(None, 4096)	0
dense (Dense)	(None, 1024)	4195328
dense_1 (Dense)	(None, 5)	5125

Total params: 4,226,357 Trainable params: 4,226,357 Non-trainable params: 0

Рис. 6. Структура сверточной нейронной сети

Размер одного пакета представляет собой количество обучающих примеров для одной итерации обучения нейронной сети. Чем больше размер пакета, тем больше памяти потребуется для вычислений. Эмпирически было подтверждено, что использование меньших размеров партий обеспечивает более быструю сходимость к успешным решениям. Выбор размера пакета co степенью лвойки помогает увеличить эффективность производительность, т.к. пакеты будут обработаны процессорами параллельно. Таким образом, был выбран размер пакета или batch size равным 32. В качестве функции потерь была выбрана categorical crossentropy, так как этот тип функции используется при многоклассовой классификации. Для выбора гиперпараметров модели воспользуемся HyperOpt и Hyperas. Это библиотеки Python для оптимизации гиперпараметров модели. Нурегорт реализует несколько алгоритмов для настройки параметров, которые позволяют получить наилучшие параметры для данной модели: метод на основе байесовской оптимизации Tree of Parzen Estimators (TPE), Random Search и Simulated Annealing. Варианты структуры модели представлены на рисунке 7.

```
model = Sequential()
model_choice = {{choice(['one', 'two'])}}
if model choice == 'one':
    model.add(Conv2D(16, (3,3), padding = 'same', activation = 'relu', input_shape = (128,128,3)))
    model.add(MaxPool2D((2,2)))
    model.add(Conv2D(16, (3,3), padding = 'same', activation = 'relu'))
    model.add(MaxPool2D((2,2)))
    model.add(Conv2D(32, (3,3), padding = 'same', activation = 'relu'))
    model.add(MaxPool2D((2,2)))
    model.add(Conv2D(64, (3,3), padding = 'same', activation = 'relu'))
    model.add(MaxPool2D((2,2)))
elif model choice == 'two':
    model.add(Conv2D(32, (3,3), padding = 'same', activation = 'relu', input shape = (128,128,3)))
    model.add(MaxPool2D((2,2)))
    model.add(Conv2D(32, (3,3), padding = 'same', activation = 'relu'))
    model.add(MaxPool2D((2,2)))
    model.add(Conv2D(64, (3,3), padding = 'same', activation = 'relu'))
    model.add(MaxPool2D((2,2)))
    model.add(Conv2D(128, (3,3), padding = 'same', activation = 'relu'))
    model.add(MaxPool2D((2,2)))
model.add(Flatten())
model.add(Dense({{choice([256, 512, 1024])}}, activation='relu'))
model.add(Dense(5, activation = 'softmax'))
model.compile(optimizer = {{choice(['rmsprop', 'adam', 'sgd'])}},
              loss = 'categorical_crossentropy', metrics = ['accuracy'])
```

Рис. 7. Вариации гиперпараметров архитектуры модели для оптимизации

По результатам работы метода Hyperas были получены в качестве оптимальных значений настраиваемых параметров следующие:

- модель CNN номер один;
- значение нейронов в полносвязном слое 1024;
- функция оптимизации обучения модели adam.

В качестве эксперимента было проведено сравнение работы одной сверточной нейронной сети и ансамбля, состоящего из 6 сверточных нейронных сетей, для классификации изображений для 3, 4 и 5 классов.

Результаты эксперимента приведены в таблице 1.

 Количество исследуемых классов
 Точность базовой модели (сверточная нейронная сеть)
 Точность ансамбля моделей

 3 класса
 98%
 98,5%

 4 класса
 94%
 95,5%

 5 классов
 88%
 91%

Таблица 1. Точность классификации тестовых объектов

Приведенные в таблице 1 результаты демонстрируют, что ансамблевый подход на основе бэггинга обеспечивает более высокую точность классификации по сравнению с одиночной CNN, причем значимость улучшения точности зависит от сложности задачи и становится более заметной с увеличением числа классов. При классификации 3-х классов точность ансамбля 98,5% лишь незначительно превышает точность базовой модели 98%. Улучшение точности 0,5%. Это может быть связано с тем, что при малом количестве классов задача классификации относительно проста, и даже одиночная CNN способна достичь почти максимальной точности. В таком случае ансамблирование дает лишь небольшой прирост за счет усреднения случайных ошибок. При классификации 4-х классов разница в точности увеличивается от 94% для базовой модели до 95,5% для ансамбля. Улучшение точности 1,5%. Это говорит о том, что с усложнением задачи ансамбль начинает демонстрировать преимущество за счет комбинирования предсказаний нескольких моделей, снижая влияние

переобучения отдельных CNN. При классификации 5-и классов преимущество ансамбля становится наиболее выраженным, 88% для базовой модели и 91% для ансамбля. Улучшение точности 3%. Увеличение количества классов усложняет классификацию, и одиночная модель начинает чаще ошибаться из-за недостаточной обобщающей способности. Ансамбль же компенсирует это за счет агрегации предсказаний, что снижает дисперсию ошибок.

Заключение. Современные промышленные системы, требующие точной классификации состояний технических объектов, сталкиваются с вызовами, связанными с зашумленностью данных, нелинейностью зависимостей и высокой размерностью признаков. В таких условиях ансамблевые методы машинного обучения демонстрируют превосходство над традиционными подходами.

Проведенное исследование подтвердило, что рассмотренные методы ансамблирования – бэггинг, бустинг и стекинг – могут эффективно решать задачи диагностики за счет:

- снижения дисперсии ошибок (бэггинг),
- коррекции смещения (бустинг),
- гибкой агрегации разнородных моделей (стекинг).

Практический эксперимент с использованием метода бэггинга на основе сверточных нейронных сетей показал увеличение точности классификации дефектов микроструктуры металла по сравнению с одиночной моделью. Это подтверждает, что агрегация предсказаний нескольких моделей позволяет минимизировать влияние случайных ошибок отдельных алгоритмов.

Однако применимость данного подхода в различных условиях ограниченна природой исходных данных и имеет ряд ограничений:

- вычислительная затратность обучение нескольких параллельно работающих CNN требует больших вычислительных ресурсов и затрат оперативной памяти, что может быть критично в реальных условиях;
- зависимость от аугментации качество генерации дополнительных данных критически влияет на результат модели;
- незначительный прирост точности для простых задач практический эксперимент показал, что при малом числе классов преимущество ансамбля может не оправдывать вычислительных затрат.

Несмотря на ограничения, внедрение предложенного подхода способно повысить надежность и безопасность эксплуатации сложных технических систем, что подтверждает актуальность и практическую ценность проведенного исследования.

#### Список источников

- 1. Кашницкий Ю.С. История развития ансамблевых методов классификации в машинном обучении. Июнь 2015. DOI:10.13140/RG.2.1.3933.2007.
- 2. Городецкий В.И. Методы и алгоритмы коллективного распознавания / В.И. Городецкий, С.В. Серебряков // Труды СПИИРАН, 2006. №3 (1). С. 139-171.
- 3. Краковский Ю.М. Исследование современных методов построения прогнозирующих ансамблей применительно к задаче интервального прогнозирования / Ю.М. Краковский, А.Н. Лузгин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование, 2017. №3 (55). С. 94-101.
- 4. Hoeffding W. Probability inequalities for sums of bounded random variables. Journal of the American statistical association, 1963, vol. 58, no. 301, pp. 13-30, DOI:10.2307/2282952.
- 5. Шитиков В.К. Классификация, регрессия, алгоритмы Data Mining с использованием R. / В.К. Шитиков, С.Э. Мастицкий, 2017. URL: https://ranalytics.github.io/data-mining/044-Ensembles.html.
- 6. Breiman L. Pasting small votes for classification in large databases and on-line. Machine Learning, 1999, vol. 36, no. 1, pp. 85-103.
- 7. Ho T. The random subspace method for constructing decision forests. Pattern analysis and machine intelligence, 1998, vol. 20, no. 8, pp. 832-844.

- 8. Louppe G., Geurts P. Ensembles on random patches. Machine learning and knowledge discovery in databases, 2012, pp. 346-361.
- 9. Кугаевских А.В. Классические методы машинного обучения: учебное пособие / А.В. Кугаевских, Д.И. Муромцев, О.В. Кирсанова, 2022. С. 43-46.
- 10. Салахутдинова К.И. Алгоритм градиентного бустинга деревьев решений в задаче идентификации программного обеспечения / К.И. Салахутдинова, И.С. Лебедев, И.Е. Кривцова // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2018. Том 18. № 6. С. 1016-1022.
- 11. Zhu J., Zou H., Rosset S., et al. Multi-class AdaBoost. Statistics and its interface, 2009, vol. 2, pp. 349-360.
- 12. Снопкова И.А. Исследование эффективности процедуры стекинга при решении задач классификации / И.А. Снопкова, Л.В. Липинский // Актуальные проблемы авиации и космонавтики, 2020. Том 2. С. 89-90.
- 13. Woźniak M., Graña M., Corchado E. A survey of multiple classifier systems as hybrid systems. Information fusion, 2014, vol. 18, pp. 3-15, DOI:10.1016/j.inffus.2013.04.006.
- 14. Prokhorenkova L., Gusev G., Vorobev A., et al. CatBoost: unbiased boosting with categorical features. Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS), 2018, vol. 31, pp. 1-9, DOI:10.48550/arXiv.1706.09516.
- 15. Sagi O., Rokach L. Ensemble learning: a survey. Wiley interdisciplinary reviews: data mining and knowledge discovery, 2018, vol. 8, no. 4, p. 1249, DOI:10.1002/widm.1249.

**Ломакина Любовь Сергеевна.** Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Вычислительные системы и технологии» НГТУ им. Р.Е. Алексеева. AuthorID: 8366, SPIN: 8087-4043, ORCID: 0000-0002-5598-6079. llomakina@list.ru.

**Двитовская Алиса Николаевна.** Аспирант кафедры «Вычислительные системы и технологии» НГТУ им. Р.Е. Алексевва. AuthorID: 1313137, SPIN: 5923-2349, ORCID: 0009-0007-3250-5520, avd.alisa@gmail.com.

**Корелин Кирилл Александрович.** Магистрант кафедры «Вычислительные системы и технологии» НГТУ им. Р.Е. Алексеева. AuthorID: 1314707, SPIN: 5952-2314, ORCID: 0009-0009-4838-1838, kirill-korelin2@mail.ru.

UDC 004.8

DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.003

### Diagnostics and forecasting of technical and technological object states based on ensemble machine learning technologies

### Lyubov S. Lomakina, Alisa N. Dvitovskaya, Kirill A. Korelin

Nizhny Novgorod state technical university named after R.E. Alekseev,

Russia, Nizhny Novgorod, llomakina@list.ru

Abstract. The article investigates the application of ensemble machine learning methods for diagnosing and forecasting the states of technical and technological objects under conditions of noisy data, nonlinear dependencies, and high-dimensional feature spaces. The relevance of the work is driven by the need to enhance the reliability of industrial systems through minimizing accident risks and optimizing operational processes. Traditional approaches demonstrate insufficient accuracy in complex scenarios, motivating the use of ensemble technologies that combine predictions from multiple models to achieve robust results. The primary focus is on Bagging, Boosting, and Stacking methods, their mathematical foundations, and practical implementation. An experiment was conducted using an ensemble of convolutional neural networks (CNNs) for classifying defects in metal microstructure. The results showed an increase in prediction accuracy with an increasing number of classes compared to a single model, confirming the effectiveness of ensembles in reducing error variance and correcting model bias. The proposed approach demonstrates potential for integration into industrial systems, enhancing diagnostic reliability and operational safety of complex technical systems.

**Keywords:** technical object diagnostics, state forecasting, ensemble methods, bagging, boosting, stacking, convolutional neural networks

#### References

- Kashnitsky Y.S. Istoriya razvitiya ansamblevykh metodov klassifikatsii v mashinnom obuchenii [History of the development of ensemble classification methods in machine learning]. June 2015. DOI:10.13140/RG.2.1.3933.2007.
- 2. Gorodetsky V.I., Serebryakov S.V. Metody i algoritmy kollektivnogo raspoznavaniya [Methods and algorithms of collective recognition]. Trudy SPIIRAN [Proceedings of SPIIRAS], 2006, no. 3 (1), pp. 139-171.
- 3. Kravkovsky Y.M., Luzgin A.N. Issledovanie sovremennykh metodov postroeniya prognoziruyushchikh ansambley primenitel'no k zadache interval'nogo prognozirovaniya [Research of modern methods for constructing predictive ensembles for interval forecasting]. Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2017, no. 3 (55), pp. 94-101.
- 4. Hoeffding W. Probability inequalities for sums of bounded random variables. Journal of the American statistical association, 1963, vol. 58, no. 301, pp. 13-30, DOI:10.2307/2282952.
- 5. Shitikov V.K., Mastitsky S.E. Klassifikatsiya, regressiya, algoritmy Data Mining s ispol'zovaniem R [Classification, regression, Data Mining algorithms using R], 2017, available at: https://ranalytics.github.io/datamining/044-Ensembles.html.
- 6. Breiman L. Pasting small votes for classification in large databases and on-line. Machine Learning, 1999, vol. 36, no. 1, pp. 85-103.
- 7. Ho T. The random subspace method for constructing decision forests. Pattern analysis and machine intelligence, 1998, vol. 20, no. 8, pp. 832-844.
- 8. Louppe G., Geurts P. Ensembles on random patches. Machine learning and knowledge discovery in databases, 2012, pp. 346-361.
- 9. Kugaevskikh A.V., Muromtsev D.I., Kirsanova O.V. Klassicheskie metody mashinnogo obucheniya: uchebnoe posobie [Classical machine learning methods: textbook], 2022, pp. 43-46.
- 10. Salakhutdinova K.I., Lebedev I.S., Krivtsova I.E. Algoritm gradientnogo bustinga derev'ev resheniy v zadache identifikatsii programmnogo obespecheniya [Gradient boosting algorithm of decision trees in the problem of software identification]. Nauchno-tekhnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki [Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and optics], 2018, vol. 18, no. 6, pp. 1016-1022.
- 11. Zhu J., Zou H., Rosset S., et al. Multi-class AdaBoost. Statistics and its interface, 2009, vol. 2, pp. 349-360.
- 12. Snopkova I.A., Lipinsky L.V. Issledovanie effektivnosti protsedury stekinga pri reshenii zadach klassifikatsii [Study of the effectiveness of the stacking procedure in solving classification problems]. Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki [Actual problems of aviation and cosmonautics], 2020, vol. 2, pp. 89-90.
- 13. Woźniak M., Graña M., Corchado E. A survey of multiple classifier systems as hybrid systems. Information fusion, 2014, vol. 18, pp. 3-15, DOI:10.1016/j.inffus.2013.04.006.
- 14. Prokhorenkova L., Gusev G., Vorobev A., et al. CatBoost: unbiased boosting with categorical features. Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS), 2018, vol. 31, pp. 1-9, DOI:10.48550/arXiv.1706.09516.
- 15. Sagi O., Rokach L. Ensemble learning: a survey. Wiley interdisciplinary reviews: data mining and knowledge discovery, 2018, vol. 8, no. 4, p. 1249, DOI:10.1002/widm.1249.

**Lomakina Lyubov Sergeevna.** Doctor of Technical Science, Professor, Professor of the Department of Computing Systems and Technologies at the NNSTU named after R.E. Alekseev. AuthorID: 8366, SPIN: 8087-4043, ORCID: 0000-0002-5598-6079, llomakina@list.ru.

**Dvitovskaya Alisa Nikolaevna.** Postgraduate student of "Computational Systems and Technologies," NSTU named after R.E. Alekseev. AuthorID: 1313137, SPIN: 5923-2349, ORCID: 0009-0007-3250-5520, avd.alisa@gmail.com

Korelin Kirill Aleksandrovich. Master's Student, Department of "Computational Systems and Technologies," NSTU named after R.E. Alekseev. AuthorID: 1314707, SPIN: 5952-2314, ORCID: 0009-0009-4838-1838, kirill-korelin2@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17.04.2025; одобрена после рецензирования 27.05.2025; принята к публикации 16.10.2025.

The article was submitted 04/17/2025; approved after reviewing 05/27/2025; accepted for publication 10/16/2025.

УЛК 519.2

DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.004

# Оценка параметров стохастических потоков событий методами машинного обучения

## Салимзянова Дарья Дмитриевна, Лисовская Екатерина Юрьевна, Самойлов Сергей Антонович

Томский государственный университет,

Россия, Томск, darya2001@inbox.ru

Аннотация. В данной работе рассматривается задача оценки параметров стохастических потоков событий на основе выборочных данных с применением методов машинного обучения. Потоки событий, характеризуемые случайными интервалами между моментами их наступления, широко применяются в моделировании сетевого трафика, телекоммуникаций, вычислительных систем и в теории массового обслуживания. Точная оценка параметров таких потоков имеет ключевое значение для последующего анализа, прогнозирования и управления нагрузкой в системах с неопределённой входной информацией. В качестве исходных данных для обучения моделей были использованы моменты наступления событий в двух типах потоков: пуассоновский поток (интервалы между событиями подчиняются экспоненциальному распределению), рекуррентный поток, (интервалы между событиями следуют одной из двенадцати функций распределения вероятностей: гамма, гиперэкспоненциальное, логнормальное, равномерное, обратное гамма, распределение Вейбулла, Парето, Леви, Фишера, Фреше, Ломакса и Бура XII). Выбор этих распределений обусловлен их разнообразными статистическими свойствами (наличие/отсутствие моментов, асимметрия, тяжёлые хвосты), что позволяет охватить широкий спектр применимых сценариев. Для решения задачи оценки параметров были использованы полносвязные нейронные сети и алгоритм градиентного бустинга в реализации CatBoost. Входными данными для моделей были выбраны интервалы между моментами наступления событий и числовые характеристики этих интервалов: математическое ожидание, среднеквадратичное отклонение, дисперсия, коэффициент вариации, квантили различных уровней. Для оценки качества моделей применялись классические метрики машинного обучения: МАЕ, RMSE, R<sup>2</sup>. Также в рамках исследования была проведена оценка важности признаков, участвующих в обучении моделей. Для этого использовались встроенные механизмы интерпретации градиентного бустинга, позволяющие количественно определить вклад каждого признака в оценку параметров.

Ключевые слова: идентификация трафика, сетевой трафик, оценка параметров, градиентный бустинг

**Цитирование:** Салимзянова Д.Д. Оценка параметров стохастических потоков событий методами машинного обучения / Д.Д. Салимзянова, Е.Ю. Лисовская, С.А. Самойлов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. — № 4(40). — C.38-51. — DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.004.

Введение. Современные информационные и телекоммуникационные сети сталкиваются с увеличением разнообразия интернет-трафика, что обусловлено широким распространением цифровых сервисов, мультимедийного контента, а также многообразием аппаратного и программного обеспечения. Это усложняет задачу обеспечения надежности и высокой производительности передачи данных. Интернет-трафик играет ключевую роль в функционировании информационных сетей, поскольку его анализ позволяет выявлять поведенческие характеристики пользователей и оценивать параметры работы сети. Правильная оценка параметров сетевого трафика является важным инструментом для решения множества задач: моделирования нагрузки на каналы связи, оптимального распределения сетевых ресурсов, маршрутизации данных и предотвращения перегрузок. В связи с этим возрастает актуальность автоматизированных методов идентификации интернеттрафика, направленных на улучшение качества сетевых услуг.

При изучении различных статистических исследований реальных телекоммуникационных потоков было установлено, что сетевой трафик обладает следующими важными свойствами: фрактальность, самоподобие, импульсность долговременная зависимость трафика, исходя из которых, следует, что широко применяемые в настоящее время методы моделирования, основанные на использовании пуассоновских потоков, не дают полной и точной картины происходящего в сети. Задача исследования состоит в том, чтобы разработать программный продукт, который в режиме реального времени будет выбирать оптимальную модель системы массового обслуживания процесса на основе данных о времени поступления пакетов и оценивать параметры этой системы. Такой программный комплекс даст возможность эффективно управлять обработкой сетевого трафика, а также не упрощать математические модели при изучении новых технологий.

Свойство импульсности характеризуется наличием интервалов, в которых интенсивность трафика довольно высока, и интервалов с низкой/нулевой интенсивностью. Большинство классических работ по теории массового обслуживания и проектированию сетей связи основаны на предположении, что процесс поступления пакетов является пуассоновским [1-3]. Детальные исследования интернет-трафика показали, что процесс поступления пакетов не пуассоновский [4], а импульсный [5-7]. Длительности интервалов между двумя последовательными моментами поступления пакетов не являются независимыми и экспоненциально распределенными, а пакеты приходят пачками, поэтому интенсивность трафика колеблется во времени.

Интернет-трафик нелегко охарактеризовать из-за его неоднородной природы. Исследования различных типов трафика выявили, что сетевой трафик обладает свойствами самоподобия (фрактальности) [8], это означает, что в нем присутствуют пачки пакетов, наблюдаемые в различных временных интервалах. Также самоподобный трафик обладает свойством долговременной зависимости (зависимости между событиями через достаточно большие промежутки времени) [9]. Самоподобный трафик иногда можно описать с помощью рекуррентных потоков с использованием распределений с «тяжелыми хвостами», таких, как Парето, Вейбулла, логнормальное, гиперэкспоненциальное распределения со специальным выбором значений параметров для описания времени между поступлениями [10-12]. Использование рекуррентных потоков более точно описывает поведение сетевого трафика (локальный и глобальные сети) [9, 13], так как позволяет фиксировать зависимость между событиями на большом расстоянии и самоподобие трафика. В некоторых случаях распределения с «тяжелыми хвостами» имеют бесконечные моменты, что не позволяет использовать метод моментов для оценки параметров.

Методы идентификации сетевого трафика можно разделить на три основные категории: методы, основанные на портах; методы, использующие глубокую инспекцию пакетов; методы, основанные на машинном обучении.

Методы, основанные на портах и IP-адресах, являются самыми простыми и быстрыми, но их точность не превышает 70% [14, 15]. Современные приложения используют динамические номера портов, что снижает точность этого метода [16]. Методы, основанные на глубокой инспекции пакетов, позволяют получить точную классификацию [17-19], но требуют высокоскоростного оборудования, сложного программного обеспечения и больших вычислительных ресурсов. При шифровании приложений доступна только общая информация о пакете.

В настоящее время популярность приобретают методы машинного обучения и глубокого обучения для классификации сетевого трафика [20-26]. В большинстве работ по идентификации интернет-трафика используются наборы данных, содержащие характеристики передаваемых пакетов, и не стоит задача определения оценки интенсивности входящего потока согласно аппроксимации какой-либо из математических моделей для последующего использования.

1. Описание исследуемых данных и используемых архитектур. В качестве исследуемых данных были использованы выборки, содержащие моменты наступления

событий в потоке  $t_i$ , полученные путем моделирования [27]. В работе исследовались стационарный пуассоновский поток и рекуррентный поток с 12 функциями распределения вероятностей длин интервалов между моментами наступления событий: гамма, гиперэкспоненциальное, логнормальное, равномерное, обратное гамма, Вейбулла, Парето, Леви, Фишера, Фреше, Ломакса и Бура XII. Выборки содержат информацию о количестве моментов наступления событий, а также о параметрах, с которыми они были сгенерированы (таблицы 1-2). Количество выборок для всех потоков равно 10000, количество интервалов в выборке — 10000.

Таблица 1. Значения параметров пуассоновского потока

Параметр	Значение
Значение интенсивности, λ	$\lambda = unif(0; 20000)$

Таблица 2. Значения параметров распределений длин интервалов рекуррентного потока

Распределение	Значение
Г	$\alpha = unif(0,5;5)$
Гамма	$\beta = unif(0,1;10)$
Потический	$\mu = unif(-2; 2)$
Логнормальное	$\sigma = unif(0,1;1,5)$
Danyayanyaa	a = unif(0,01;1)
Равномерное	b = unif(a; 10)
Ройбунно	k = unif(0,1;10)
Вейбулла	$\theta = unif(0,5;3)$
Леви	$\mu = unif(0,01;0,5)$
ЛСБИ	c = unif(0,1;10)
Фишера	$d_1 = unif(0,01;1)$
Фишера	$d_2 = unif(1,5;3)$
Парето	$x_m = unif(0.01; 10)$
Trapero	a = unif(1,5;3)
Обратное гамма	a = unif(1,5;3)
Обранное тамма	c = unif(0,01;1)
Ломакса	a = unif(1,5;3)
Tomanou	$\lambda = unif(0,01;1)$
	$\lambda_1 = unif(0,1;10)$
Гиперэкспоненциальное	$\lambda_2 = unif(0,01;1)$
	p = unif(0,1;0,9)
	$\alpha = unif(1,5;3)$
Бура XII	$\beta = unif(1,5;3)$
	c = unif(0,01;1)
	$\alpha = unif(1,5;3)$
Фреше	s = unif(0,01;1)
	m = unif(0; 0,5)

**2.** Метрики качества оценки параметров. В качестве метрик для измерения обобщающей способности моделей оценки параметров были использованы: MAPE, MAE, RMSE,  $R^2$ .

Средняя абсолютная процентная погрешность (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) измеряет отклонение прогнозов от фактических значений в процентах:

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i},$$

где n — количество наблюдений,  $y_i$  — действительное значение переменной,  $\hat{y}_i$  — предсказанное значение.

Средняя абсолютная ошибка (Mean Absolute Error, MAE) является линейной оценкой, следовательно, все ошибки в среднем взвешены одинаково:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} |y_i - \hat{y}_i|.$$

Квадратный корень из среднеквадратичной ошибки (Root Mean Squared Error, *RMSE*) показывает, на сколько в среднем отклоняется прогноз от реального значения:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{y}_i)^2}.$$

Коэффициент детерминации (Coefficient of determination,  $R^2$ ) — это наиболее интуитивная и понятная метрика, которая показывает, насколько данная модель работает лучше, чем «наивная» модель:

$$R^{2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (y_{i} - \hat{y}_{i})^{2}}{\sum_{i=1}^{n} (y_{i} - \overline{y})^{2}},$$

где  $\bar{y}$  — выборочное среднее  $y_i$ . Для модели с идеальной предсказывающей способностью коэффициент детерминации равен 1.

**3.** Оценка параметров потоков. Задача оценки значений параметров исследуемых потоков является задачей регрессии, так как значения параметров являются непрерывными. Под регрессией принято понимать зависимость среднего значения какой-либо величины от некоторой другой величины или от нескольких величин. Если пространство объектов обозначить как X, и множество возможных ответов Y, то существует неизвестная целевая зависимость  $y^*: X \to Y$ , значения которой известны только на объектах обучающей выборки  $X^l = (x_i, y_i)_{i=1}^l$ ,  $y_i = y^*(x_i)$ . Требуется построить алгоритм, который принято называть функцией регрессии  $f: X \to Y$ , аппроксимирующей целевую зависимость  $y^*$ . В выборках для обучения содержится целевая переменная, поэтому такая задача относится к классу задач обучения с учителем.

В качестве модели для оценки параметров в пуассоновском и рекуррентном потоках был использован CatBoostRegressor, для каждого параметра была обучена отдельная модель, на трех наборах данных (НД):

- 1) моменты наступления событий в потоке  $t_i$ ;
- 2) интервалы между моментами наступления событий в потоке  $\tau_i = t_i t_{i-1}$ ;
- 3) 10 числовых характеристик интервалов  $\tau_i$  (математическое ожидание, среднеквадратичное отклонение, дисперсия, коэффициент вариации, 6 квантилей: 0,1; 0,25; 0,5; 0,75; 0,9; 0,95).
- **а.** Пуассоновский поток. В работе [28] значение параметра пуассоновского потока варьировалось на интервале (0;10000), для его оценки использовались различные архитектуры нейронных сетей. Значение метрик MAE = 226,271 и  $R^2 = 0,989$ . В этой работе был увеличен интервал допустимых значений параметра (0;20000) и использован алгоритм градиентного бустинга (ГБ) CatBoostRegressor для оценки параметра простейшего потока. Также была проведена оценка параметра с помощью метода моментов (ММ), для этого потока был выбран

первый начальный момент. В таблице 3 приведены значения метрик качества для ММ и для алгоритма, основанного на градиентном бустинге.

Таблица 3. Значения метрик качества оценки параметров пуассоновского потока
---

Модель	НД	MAPE	MAE	RMSE	$R^2$
ГБ	1	2,574	82,304	108,852	0,999
ГБ	2	11,529	667,714	855,737	0,977
ГБ	3	1,259	88,525	124,405	0,999
MM	2	0,808	78,863	114,461	0,999

Как видно из таблицы 3, несмотря на увеличение интервала допустимых значений параметра пуассоновского потока, по сравнению с интервалом в работе [28], метрики качества модели улучшились, а, следовательно, и предсказательная способность модели. Лучше всего параметр оценивается с помощью метода моментов, при использовании метода градиентного бустинга модель лучше обобщает данные при обучении на 3-м наборе данных, который содержит числовые характеристики интервалов  $\tau_i$ .

**б. Рекуррентный поток.** Для рекуррентных потоков с функциями распределения вероятностей (ФРВ) длин интервалов: гамма, равномерная, логнормальная, гиперэкспоненциальная, Вейбулла параметры были оценены с помощью метода моментов (ММ), для остальных ФРВ с помощью метода наименьших квадратов (МНК). Метод наименьших квадратов использовался для тех ФРВ, в которых некоторые моменты не существуют или равны бесконечности, поэтому использование метода моментов для таких ФРВ невозможно.

В работе [29] были рассмотрены оценки параметров для некоторых ФРВ длин интервалов рекуррентного потока, в этой работе были использованы другие интервалы допустимых значений параметров, которые наиболее приближены к реальным параметрам потоков в сетевом трафике.

В таблицах 4-15 представлены значения метрик качества оценки параметров рекуррентного потока с разными функциями распределения длин интервалов между моментами наступления событий.

Таблица 4. Значения метрик качества оценки параметров рекуррентного потока с гамма ФРВ

Tuotinga Wona tening merpina autoriba enemai napamerpes pengippenintere nereka e tamma 112							
Модель	НД	Параметр	MAPE	MAE	RMSE	$R^2$	
ГБ	1	α	26,719	0,542	0,678	0,725	
	1	β	24,822	0,832	1,035	0,867	
ГБ	2	α	17,047	0,360	0,445	0,890	
1 D		β	12,208	0,558	0,769	0,929	
ГБ	3	α	1,451	0,037	0,048	0,999	
		β	2,124	0,080	0,110	0,999	
MM	2	α	1,362	0,035	0,047	0,999	
		β	1,436	0,073	0,107	0,999	

**Таблица 5.** Значения метрик качества оценки параметров рекуррентного потока с логнормальной ФРВ

Модель	НД	Параметр	MAPE	MAE	RMSE	$R^2$
ГБ 1	1	μ	164,918	0,481	0,638	0,694
	σ	18,482	0,247	0,306	0,954	
ГБ	2	μ	36,692	0,107	0,147	0,984
	2	σ	8,461	0,158	0,211	0,978
ГБ	2	μ	7,388	0,024	0,034	0,999
	3	σ	1,183	0,024	0,032	0,999

MM 2	2	μ	1052,656	1,921	2,981	0,003
	2	σ	17,487	0,652	0,961	0,543

**Таблица 6.** Значения метрик качества оценки параметров рекуррентного потока с равномерной ФРВ

			1 /11			1
Модель	НД	Параметр	MAPE	MAE	RMSE	$R^2$
ГБ	1	а	152,170	0,233	0,273	0,117
l D	1	b	6,880	0,240	0,283	0,989
ГБ	2	а	34,250	0,061	0,079	0,926
1 D	\ \( \frac{\alpha}{2} \)	b	3,126	0,142	0,037	0,995
ГБ	3	а	7,696	0,017	0,023	0,994
		b	0,809	0,028	0,036	0,999
MM	2	а	6,751	0,014	0,020	0,995
	2	b	0,251	0,014	0,020	0,999

**Таблица 7.** Значения метрик качества оценки параметров рекуррентного потока с ФРВ Вейбулла

Модель	НД	Параметр	MAPE	MAE	RMSE	$R^2$
ГБ	1	k	5,162	0,215	0,418	0,979
1 D	1	θ	26,153	0,386	0,471	0,570
PP	2	k	5,607	0,199	0,307	0,989
ГБ	2	θ	10,025	0,154	0,191	0,929
ГБ	3	k	1,371	0,045	0,063	0,999
		θ	1,220	0,019	0,025	0,999
MM	2	k	0,927	0,045	0,228	0,994
		θ	1,173	0,015	0,037	0,997

Таблица 8. Значения метрик качества оценки параметров

## рекуррентного потока с ФРВ Леви MAE RMSE $R^2$

Модель	НД	Параметр	MAPE	MAE	RMSE	$R^2$
ГБ	1	μ	146,863	0,021	0,143	0,487
1 D	1	С	91,938	33,248	5,766	0,042
ГБ	2	μ	128,981	0,019	0,138	0,032
	2	С	11,693	0,223	0,472	0,973
ГБ 3	2	μ	35,601	0,003	0,054	0,851
	3	С	2,461	0,019	0,138	0,998
МНК	2	μ	150,678	0,438	0,662	0,005
		С	4,006	0,217	0,466	0,973

## **Таблица 9.** Значения метрик качества оценки параметров рекуррентного потока с ФРВ Фишера

Модель	НД	Параметр	MAPE	MAE	RMSE	$R^2$
ГБ	1	$d_1$	84,919	0,268	0,518	0,092
1 D	1	$d_2$	29,904	0,479	0,692	0,177
FF	2	$d_1$	17,915	0,006	0,080	0,922
ГБ 2	2	$d_2$	12,136	0,093	0,305	0,507
ГБ 3	2	$d_1$	3,038	0,001	0,013	0,998
	3	$d_2$	2,972	0,009	0,096	0,951
МНК	2	$d_1$	1,148	0,001	0,009	0,999
	\(\alpha\)	$d_2$	23,668	46,767	6,839	0,001

**Таблица 10.** Значения метрик качества оценки параметров рекуррентного потока с ФРВ Парето

Модель	НД	Параметр	MAPE	MAE	RMSE	$R^2$
ГБ	1	$x_m$	23,895	0,472	0,686	0,172
	1	а	93,331	0,321	0,567	0,046
ГБ 2	2	$x_m$	9,281	0,056	0,238	0,693
	2	а	5,930	0,001	0,024	0,993
ГБ	2	$x_m$	1,457	0,002	0,045	0,989
	3	а	1,234	0,001	0,004	0,999
МНК	2	$x_m$	0,905	0,001	0,026	0,996
	2	a	0,120	0,001	0,001	0,999

**Таблица 11.** Значения метрик качества оценки параметров рекуррентного потока с ФРВ обратное гамма

			1 711			*
Модель	НД	Параметр	MAPE	MAE	RMSE	$R^2$
- CC	1	а	29,693	0,476	0,690	0,171
ГБ	1	С	414,240	0,317	0,563	0,062
FF	EE 2	а	10,907	0,077	0,278	0,582
ГБ	2	С	11,732	0,006 0,077	0,931	
ГБ	FF 2	а	1,566	0,002	0,046	0,988
1 D	3	С	2,256	0,001	0,012	0,998
MILIC	12	а	1,273	0,002	0,037	0,993
МНК	2	С	115,412	115,239	0,563     0,062       0,278     0,582       0,077     0,931       0,046     0,988       0,012     0,998       0,037     0,993	0,001

**Таблица 12.** Значения метрик качества оценки параметров рекуррентного потока с ФРВ Ломакса

				1 .11		
Модель	НД	Параметр	MAPE	MAE	RMSE	$R^2$
EE 1	1	а	19,012	0,203	0,451	0,476
ГБ	1	λ	93,738	0,320	0,566	0,046
ГБ		а	13,768	0,125	0,354	0,325
1 D	2	λ	23,124	0,011	0,106	0,860
PP	TF 2	а	3,045	0,009	0,093	0,954
ГБ	3	λ	4,526	0,001	0,028	0,990
MILIC	2	а	4,729	0,112	0,334	0,398
МНК	2	λ	6,233	0,002	0,044	0,046 0,325 0,860 <b>0,954</b> <b>0,990</b>

**Таблица 13.** Значения метрик качества оценки параметров рекуррентного потока с гиперэкспоненциальной ФРВ

		реку	ppemmere	110101000 0 1111	reparement	The initial at p
Модель	НД	Параметр	MAPE	MAE	RMSE	$R^2$
	$\lambda_1$	71,585	1,389	1,671	0,661	
ГБ	1	$\lambda_2$	49,960	0,626	0,807	0,686
		p	53,577	0,160	0,190	0,335
		$\lambda_1$	87,356	1,349	1,799	0,609
ГБ	2	$\lambda_2$	98,425	0,771	1,002	0,522
		p	62,755	0,182	0,217	0,159
	$\lambda_1$	50,602	0,782	1,091	0,856	
ГБ	3	$\lambda_2$	54,087	0,534	0,802	0,694
		p	50,699	0,144	0,190	0,357
MM 2		$\lambda_1$	48,715	1,979	2,856	0,045
	2	$\lambda_2$	23,980	0,628	1,090	0,432
		p	63,248	0,246	0,297	0,356

**Таблица 14.** Значения метрик качества оценки параметров рекуррентного потока с ФРВ Бура XII

Модель	НД	Параметр	MAPE	MAE	RMSE	$R^2$
		α	23,443	0,466	0,683	0,177
ГБ	1	β	17,303	0,183	0,428	0,014
		С	89,139	0,304	0,551	0,062
		α	8,807	0,052	0,228	0,717
ГБ	2	β	15,845	0,160	0,401	0,137
		С	11,121	0,005	0,068	0,943
		α	1,864	0,003	0,057	0,982
ГБ	3	β	6,822	0,037	0,193	0,799
		С	4,734	0,001	0,029	0,990
		α	153,388	718,761	26,810	0,004
MM	2	β	25,688	1,423	1,193	0,001
		С	106,177	1,831	1,353	0,001

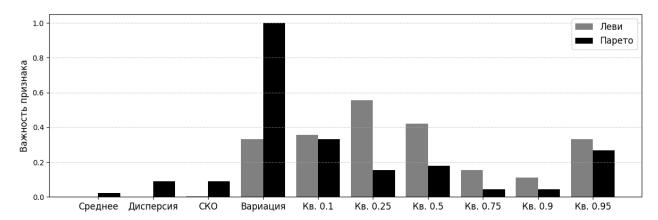
**Таблица 15.** Значения метрик качества оценки параметров рекуррентного потока с ФРВ Фреше

				1 711		1
Модель	НД	Параметр	MAPE	MAE	RMSE	$R^2$
		α	17,142	0,188	0,434	0,498
ГБ	1	S	75,077	0,228	0,477	0,145
		m	190,050	0,105	0,324	0,019
		α	11,737	0,092	0,304	0,505
ГБ	2	S	23,256	0,008	0,091	0,900
		m	235,351	0,007	0,086	0,646
	α	4,107	0,017	0,132	0,907	
ГБ	3	S	6,842	0,001	0,030	0,989
		m	5,188	0,001	0,027	0,964
		α	12,550	6,235	2,497	0,004
MM	2	S	15,850	0,003	0,054	0,963
		m	63,719	0,003	0,062	0,815

Для рекуррентного потока со следующими ФРВ: гамма, равномерная, Парето метод моментов и метод наименьших квадратов лучше оценивают параметры, исходя из метрик качества. Стоит отметить, что оценивание параметров с помощью алгоритма градиентного бустинга на 3-м наборе данных для этих ФРВ также показывает стабильные и точные результаты, с незначительным отставанием по метрикам, что подтверждает его практическую применимость. Для всех остальных ФРВ модель алгоритма градиентного бустинга, обученная на числовых характеристиках случайной величины длина интервалов, показывает лучшие метрики при сравнении с другими моделями. В отдельных случаях наблюдается незначительное преимущество методов ММ или МНК, однако оно, вероятно, не является устойчивым и может не воспроизводиться при использовании других наборов данных.

**4.** Оценка важности используемых признаков. Одним из ключевых этапов при построении моделей машинного обучения является выбор информативных признаков. В этой работе в качестве признаков для обучения регрессионных моделей рассматриваются числовые характеристики случайной величины. Сравнительный анализ важности этих признаков позволяет не только повысить точность моделей, но и глубже понять, какие числовые характеристики наиболее полно отражают свойства конкретных распределений.

На рисунке 1 представлены графики важности признаков для двух моделей, обученных на числовых характеристиках выборок из распределений Леви и Парето. Каждый столбец на графиках отражает вклад соответствующего признака в предсказание параметров.



**Рис. 1.** Сравнение важности числовых признаков при оценке параметров для распределений Леви и Парето

Распределение Леви представляет собой тяжелохвостое и асимметричное распределение, для которого математическое ожидание и дисперсия часто не существуют или нестабильны. В соответствии с этим, наибольшую важность для модели представляют квантили, характеризующие поведение правого хвоста. Такие признаки, как среднее и дисперсия, оказываются слабо информативными, что соответствует теоретическим ограничениям распределения Леви.

Для распределения Парето ключевую роль играет коэффициент вариации, отражающий степень разброса значений, что согласуется с природой степенных распределений. Средними по значимости являются стандартное отклонение и квантили, особенно крайние, которые позволяют уточнять поведение хвостов при наличии конечных моментов (например, при  $\alpha > 2$ ).

Дополнительно были проанализированы важности признаков для других распределений (рис. 2).

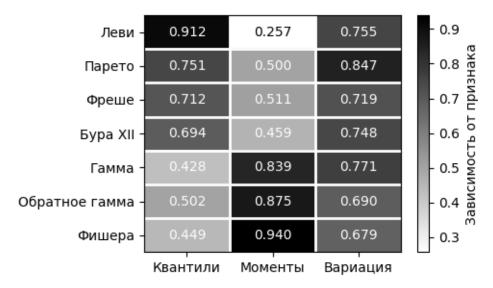


Рис. 2. Сравнение важности числовых признаков при оценке параметров

Полученные результаты демонстрируют, что информативность тех или иных выборочных статистик существенно зависит от природы распределения:

- для тяжелых и асимметричных распределений (Леви, Парето, Фреше, Бура XII) наибольшую значимость имеют квантили и коэффициент вариации, поскольку классические моменты либо не существуют, либо не обеспечивают стабильной оценки параметров;
- для распределений с устойчивыми моментами (гамма, обратное гамма, экспоненциальное, Фишера) наиболее полезными оказываются среднее, дисперсия и стандартное отклонение, которые напрямую связаны с параметрами этих распределений и позволяют добиться высокой точности оценки.

Таким образом, выбор признаков для оценки параметров распределений должен учитывать теоретические свойства конкретного распределения. Использование информативных характеристик позволяет существенно повысить точность моделей и интерпретируемость оценок параметров используемых моделей.

Заключение. В представленной работе были обучены модели машинного обучения для оценки параметров различных типов потоков: пуассоновского и рекуррентного с 12 различными распределениями интервалов между моментами наступления событий. Использован алгоритм градиентного бустинга (CatBoost), а также классические методы оценки, такие, как метод моментов (ММ) и метод наименьших квадратов (МНК).

Для оценки параметра  $\lambda$  пуассоновского потока были использованы метод моментов и градиентный бустинг. Лучшие результаты показал метод моментов со значениями метрик  $MAE=78,863,\ RMSE=114,461$  и  $R^2=0,999.$  Однако градиентный бустинг также продемонстрировал высокие показатели, особенно при обучении на третьем наборе данных:  $MAE=88,525,\ RMSE=124,405$  и  $R^2=0,999.$ 

Для рекуррентного потока лучшими оказались различные методы в зависимости от функции распределения вероятностей длин интервалов между моментами наступления событий. Для рекуррентного потока с функциями распределения вероятностей длин интервалов: гамма, равномерная, Парето метод моментов и метод наименьших квадратов лучше оценивают параметры, исходя из метрик качества, коэффициент детерминации больше 0.995. Для остальных лучше всего себя показала модель градиентного бустинга, обученная на наборе данных, содержащем числовые характеристики интервалов между моментами наступления событий. В большинстве таких случаев значение  $R^2$  превышало 0.900, что свидетельствует о высокой точности даже для тяжелохвостых распределений.

Таким образом, использование моделей машинного обучения обеспечивает высокую точность оценки параметров потоков и может рассматриваться как надежная альтернатива или дополнение к классическим статистическим методам. Несмотря на то, что в отдельных случаях метод моментов и метод наименьших квадратов показывают незначительно лучшие результаты, модель градиентного бустинга демонстрирует универсальность, стабильность и высокое качество для всех рассмотренных распределений.

В дальнейшем планируется расширить набор исследуемых видов входящего потока, а также применить разработанные методы для анализа и прогнозирования сетевой нагрузки в реальном времени.

#### Список источников

- Ivanova D., Markova E., Moltchanov D., et al. Performance of priority-based traffic coexistence strategies in 5G mmWave industrial deployments. IEEE Access, 2022, vol. 10, pp. 9241-9256, DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3143583.
- 2. Fedorova E., Lapatin I., Lizyura O., et al. Asymptotic analysis of two-phase queueing system with service rate degradation and heterogeneous customers. 5th International Conference on Problems of Cybernetics and Informatics (PCI), 2023, pp. 1-5.

- 3. Markova E., Moltchanov D., Pirmagomedov R., et al. Prioritized service of URLLC traffic in industrial deployments of 5G NR systems. Distributed computer and communication networks, 2020, vol 12563, pp. 497-509, DOI:10.1007/978-3-030-66471-8\_38.
- 4. Paxson V., Floyd S. Wide area traffic: the failure of Poisson modeling. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1995, vol. 3, no. 3, pp. 226-244, DOI: 10.1109/90.392383.
- 5. Johnson M., Narayana S. Descriptors of arrival-process burstiness with application to the discrete Markovian arrival process. Queueing systems, 1996, vol. 23, pp. 107-130.
- 6. Vazquez A., Oliveira J., Dezso Z., Goh K.-I. Modeling bursts and heavy tails in human dynamics. Physical Review, 2006, vol. 73, no. 3, DOI: 10.48550/arXiv.physics/0510117.
- 7. Choi J., Hiraoka T., Jo H.-H. Individual-driven versus interaction-driven burstiness in human dynamics: The case of Wikipedia edit history. American physical society, 2011, vol. 104, DOI:10.48550/arXiv.2011.01562.
- 8. Leland W., Taqqu M., Willinger W., et al. On the self-similar nature of Ethernet traffic. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1994, vol. 2, no. 1, pp. 1-15, DOI: 10.1109/90.282603.
- 9. Cappe O., Moulines E., Pesquet J.-C., et al. Long-range dependence and heavy-tail modeling for teletraffic data, IEEE Signal processing magazine, 2002, vol. 19, no. 3, pp. 14-27, DOI: 10.1109/79.998079.
- 10. Arfeen M., Pawlikowski K., Willig A., et al. Fractal renewal process-based analysis of emerging network traffic in access networks. 26th International telecommunication networks and applications conference (ITNAC), 2016, pp. 265-270, DOI: 10.1109/ATNAC.2016.7878820.
- 11. Becchi M. From poisson processes to self-similarity: a survey of network traffic models, Washington University in St. Louis, 2008.
- 12. Ryu B., Lowen S. Point process approaches to the modeling and analysis of self-similar traffic .I. Model construction. Conference on computer communications, 1996, vol. 3, pp. 1468-1475, DOI: 10.1109/INFCOM.1996.493096.
- 13. Feldmann A., Gilbert A.C., Willinger W. Data networks as cascades: investigating the multifractal nature of Internet WAN traffic. Association for Computing Machinery, 1998, pp. 42-55, DOI:10.1145/285237.285256.
- 14. Moore A., Papagiannaki K. Toward the accurate identification of network applications. Passive and active network measurement: book of abstracts 6th international workshop, 2005, pp. 41-54, DOI:10.1007/978-3-540-31966-5\_4.
- 15. Dreger H., Feldmann A., Mai M., et al. Dynamic application-layer protocol analysis for network intrusion detection. 15th USENIX Security Symposium, 2006, pp. 257-272.
- Karagiannis T., Broido A., Faloutsos M., et al. Transport layer identification of P2P Traffic. 4th ACM SIGCOMM conference on Internet measurement, 2004, pp. 121-134, DOI:10.1145/1028788.1028804.
- 17. Choi T., Kim C., Yoon S., Park J. Content-aware Internet application traffic measurement and analysis. IEEE/IFIP Network operations and management symposium, 2004, vol. 1, pp. 511-524, DOI:10.1109/NOMS.2004.1317737.
- 18. Moore A., Zuev D. Internet traffic classification using bayesian analysis techniques. Measurement and Modeling of Computer Systems, 2005, vol. 33, no. 1, pp. 50-60, DOI:10.1145/1064212.1064220.
- 19. Rezaei S., Kroencke B., Liu X. Large-scale mobile app identification using deep learning. IEEE Access, 2020, vol. 8, pp. 348-362, DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2962018.
- 20. Денисенко В.В. Применение искусственного интеллекта для анализа сетевого трафика / В.В. Денисенко, А.С. Ященко // Международный журнал гуманитарных и естественных наук: международный ежемесячный научный журнал, 2023. № 1. С. 19-22.
- 21. Скрыпников А.В. Использование методов машинного обучения при решении задач информационной безопасности / А.В Скрыпников, В.В. Денисенко, И.А. Саранов // Вестник Воронежского института ФСИН России, 2020. № 4. С. 69-73.
- 22. Khan M. HCRNNIDS: Hybrid convolutional recurrent neural network-based network intrusion detection system. Processes, 2021, vol. 9, no. 5, pp. 830-844, DOI:10.3390/pr9050834.
- 23. Zheng W., Gou C., Yan L., et al. Learning to Classify: a flow-based relation network for encrypted traffic classification. In Proc. of the Web Conference, 2020, pp. 13-22, DOI:10.1145/3366423.3380090.
- 24. D'Angelo G., Palmieri F. Network traffic classification using deep convolutional recurrent autoencoder neural networks for spatial—temporal features extraction. Journal of network and computer applications, 2021, vol. 173, DOI:10.1016/j.jnca.2020.102890.
- 25. Lotfollahi M., Shirali hossein zade R., Jafari Siavoshani M., et al. Deep packet: a novel approach for encrypted traffic classification using deep learning. Soft Computing, 2020, vol. 24, DOI:10.1007/s00500-019-04030-2.
- 26. Niloofar B., Weston J., Derrick L. Deep Learning for Network Traffic Classification. arXiv, 2021, DOI:10.48550/arXiv.2106.12693.
- 27. Марголис Н.Ю. Имитационное моделирование: учеб. пособие / Н.Ю. Марголис Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2015. 88 с.

- 28. Salimzyanova D., Lisovskaya E. Identification of Network Traffic Using Neural Networks, Information Technologies and Mathematical Modelling. Queueing Theory and Applications, 2023, vol. 2163, pp. 76-90, DOI:10.1007/978-3-031-65385-8 6.
- 29. Салимзянова Д.Д. Классификация и оценка параметров распределений вероятностей длин интервалов рекуррентного потока / Д.Д. Салимзянова, Е.Ю. Лисовская // Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ-2023): Материалы XXII Международной конференции имени А.Ф. Терпугова (Томск, 4–9 декабря 2023) Томск, 2024. С. 64-69.

**Салимзянова Дарья Дмитриевна.** Томский государственный университет, ассистент, AuthorID: 1282632, SPIN: 5509-2107, ORCID: 0009-0003-8727-0918, darya2001@inbox.ru.

**Лисовская Екатерина Юрьевна.** Канд. физ.-мат. наук, Томский государственный университет, доцент, AuthorID: 863821, SPIN: 9056-4621, ORCID: 0000-0001-7345-5565, ekaterina lisovs@mail.ru.

**Самойлов Сергей Антонович.** Томский государственный университет, лаборант, ORCID: 0009-0005-8318-9885, sergei.samoilov224@gmail.com.

UDC 519.2

DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.004

### Estimation of stochastic event flow parameters using machine learning methods Daria D. Salimzyanova, Ekaterina Yu. Lisovskaya, Sergey A. Samoilov

National Research Tomsk State University, Russia, Tomsk, darya2001@inbox.ru

**Abstract.** This paper addresses the problem of estimating parameters of stochastic event flows based on sample data using machine learning methods. Event flows, characterized by random intervals between the moments of occurrence, are widely used in the modeling of network traffic, telecommunications, computing systems, and in queuing theory. Accurate estimation of such flow parameters is crucial for subsequent analysis, forecasting, and load management in systems with uncertain input information. As training data for the models, we used event arrival times from two types of streams: a Poisson flow (with inter-arrival times following the exponential distribution) and a renewal process (with inter-arrival times following one of twelve probability distributions: gamma, hyperexponential, lognormal, uniform, inverse gamma, Weibull, Pareto, Lévy, Fisher, Fréchet, Lomax, and Burr XII). These distributions were selected due to their diverse statistical properties (presence or absence of moments, asymmetry, heavy tails), which enables coverage of a broad range of applicable scenarios. To solve the parameter estimation task, we employed fully connected neural networks and the CatBoost implementation of the gradient boosting algorithm. As input features for the models, we used the inter-arrival times and their numerical characteristics: mean, standard deviation, variance, coefficient of variation, and quantiles of various levels. To evaluate the model performance, classical machine learning metrics were used: MAE, RMSE, and R<sup>2</sup>. The study also included an assessment of the importance of features used in training. This was done using built-in interpretation tools of gradient boosting, which allow for a quantitative analysis of each feature's contribution to the parameter estimation.

Keywords: traffic identification, network traffic, parameter estimation, gradient boosting

#### References

- Ivanova D., Markova E., Moltchanov D., et al. Performance of priority-based traffic coexistence strategies in 5G mmWave industrial deployments. IEEE Access, 2022, vol. 10, pp. 9241-9256, DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3143583.
- 2. Fedorova E., Lapatin I., Lizyura O., et al. Asymptotic analysis of two-phase queueing system with service rate degradation and heterogeneous customers. 5th International Conference on Problems of Cybernetics and Informatics (PCI), 2023, pp. 1-5.
- 3. Markova E., Moltchanov D., Pirmagomedov R., et al. Prioritized service of URLLC traffic in industrial deployments of 5G NR systems. Distributed computer and communication networks, 2020, vol 12563, pp. 497-509, DOI:10.1007/978-3-030-66471-8\_38.
- 4. Paxson V., Floyd S. Wide area traffic: the failure of Poisson modeling. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1995, vol. 3, no. 3, pp. 226-244, DOI: 10.1109/90.392383.

- 5. Johnson M., Narayana S. Descriptors of arrival-process burstiness with application to the discrete Markovian arrival process. Queueing systems, 1996, vol. 23, pp. 107-130.
- 6. Vazquez A., Oliveira J., Dezso Z., Goh K.-I. Modeling bursts and heavy tails in human dynamics. Physical Review, 2006, vol. 73, no. 3, DOI: 10.48550/arXiv.physics/0510117.
- 7. Choi J., Hiraoka T., Jo H.-H. Individual-driven versus interaction-driven burstiness in human dynamics: The case of Wikipedia edit history. American physical society, 2011, vol. 104, DOI:10.48550/arXiv.2011.01562.
- 8. Leland W., Taqqu M., Willinger W., et al. On the self-similar nature of Ethernet traffic. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1994, vol. 2, no. 1, pp. 1-15, DOI: 10.1109/90.282603.
- 9. Cappe O., Moulines E., Pesquet J.-C., et al. Long-range dependence and heavy-tail modeling for teletraffic data, IEEE Signal processing magazine, 2002, vol. 19, no. 3, pp. 14-27, DOI: 10.1109/79.998079.
- Arfeen M., Pawlikowski K., Willig A., et al. Fractal renewal process-based analysis of emerging network traffic in access networks. 26th International telecommunication networks and applications conference (ITNAC), 2016, pp. 265-270, DOI: 10.1109/ATNAC.2016.7878820.
- 11. Becchi M. From poisson processes to self-similarity: a survey of network traffic models, Washington University in St. Louis, 2008.
- 12. Ryu B., Lowen S. Point process approaches to the modeling and analysis of self-similar traffic .I. Model construction. Conference on computer communications, 1996, vol. 3, pp. 1468-1475, DOI: 10.1109/INFCOM.1996.493096.
- 13. Feldmann A., Gilbert A.C., Willinger W. Data networks as cascades: investigating the multifractal nature of Internet WAN traffic. Association for Computing Machinery, 1998, pp. 42-55, DOI:10.1145/285237.285256.
- 14. Moore A., Papagiannaki K. Toward the accurate identification of network applications. Passive and active network measurement: book of abstracts 6th international workshop, 2005, pp. 41-54, DOI:10.1007/978-3-540-31966-5 4.
- 15. Dreger H., Feldmann A., Mai M., et al. Dynamic application-layer protocol analysis for network intrusion detection. 15th USENIX Security Symposium, 2006, pp. 257-272.
- 16. Karagiannis T., Broido A., Faloutsos M., et al. Transport layer identification of P2P Traffic. 4th ACM SIGCOMM conference on Internet measurement, 2004, pp. 121-134, DOI:10.1145/1028788.1028804.
- 17. Choi T., Kim C., Yoon S., Park J. Content-aware Internet application traffic measurement and analysis. IEEE/IFIP Network operations and management symposium, 2004, vol. 1, pp. 511-524, DOI:10.1109/NOMS.2004.1317737.
- 18. Moore A., Zuev D. Internet traffic classification using bayesian analysis techniques. Measurement and Modeling of Computer Systems, 2005, vol. 33, no. 1, pp. 50-60, DOI:10.1145/1064212.1064220.
- 19. Rezaei S., Kroencke B., Liu X. Large-scale mobile app identification using deep learning. IEEE Access, 2020, vol. 8, pp. 348-362, DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2962018.
- 20. Denisenko V.V., Yashchenko A.S. Primeneniye iskusstvennogo intellekta dlya analiza setevogo traffika [Application of artificial intelligence for network traffic analysis]. Mezhdunarodnyy zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk [International Journal of Humanities and Natural Sciences], 2023, no. 1, pp. 19-22..
- 21. Skrypnikov A.V., Denisenko V.V., Saranov I.A. Ispol'zovaniye metodov mashinnogo obucheniya pri reshenii zadach informatsionnoy bezopasnosti [Using machine learning methods for solving information security problems]. Vestnik Voronezhskogo instituta FSIN Rossii [Bulletin of the Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia], 2020, no. 4, pp. 69-73.
- 22. Khan M. HCRNNIDS: Hybrid convolutional recurrent neural network-based network intrusion detection system. Processes, 2021, vol. 9, no. 5, pp. 830-844, DOI:10.3390/pr9050834.
- 23. Zheng W., Gou C., Yan L., et al. Learning to Classify: a flow-based relation network for encrypted traffic classification. In Proc. of the Web Conference, 2020, pp. 13-22, DOI:10.1145/3366423.3380090.
- 24. D'Angelo G., Palmieri F. Network traffic classification using deep convolutional recurrent autoencoder neural networks for spatial–temporal features extraction. Journal of network and computer applications, 2021, vol. 173, DOI:10.1016/j.jnca.2020.102890.
- 25. Lotfollahi M., Shirali hossein zade R., Jafari Siavoshani M., et al. Deep packet: a novel approach for encrypted traffic classification using deep learning. Soft Computing, 2020, vol. 24, DOI:10.1007/s00500-019-04030-2.
- 26. Niloofar B., Weston J., Derrick L. Deep Learning for Network Traffic Classification. arXiv, 2021, DOI:10.48550/arXiv.2106.12693.
- 27. Margolis N.Yu. Imitatsionnoye modelirovaniye: ucheb. posobiye [Simulation Modeling: Textbook]. Tomsk, Izdatel'skiy Dom Tomskogo gosudarstvennogo universiteta [Publishing House of Tomsk State University] Publ., 2015, 88 p.
- 28. Salimzyanova D., Lisovskaya E. Identification of Network Traffic Using Neural Networks, Information Technologies and Mathematical Modelling. Queueing Theory and Applications, 2023, vol. 2163, pp. 76-90, DOI:10.1007/978-3-031-65385-8\_6.

29. Salimzyanova D.D., Lisovskaya E.Yu. Klassifikatsiya i otsenka parametrov raspredeleniy veroyatnostey dlin intervalov rekurrentnogo potoka [Classification and estimation of probability distribution parameters for recurrent flow interval lengths]. Informatsionnyye tekhnologii i matematicheskoye modelirovaniye (ITMM-2023): Materialy XXII Mezhdunarodnoy konferentsii imeni A.F. Terpugova [Information Technologies and Mathematical Modeling (ITMM-2023): Proceedings of the XXII International Conference named after A.F. Terpugov]. Tomsk, 2024, pp. 64-69.

Salimzyanova Daria Dmitrievna. National Research Tomsk State University, Assistant, AuthorID: 1282632, SPIN: 5509-2107, ORCID: 0009-0003-8727-0918, darya2001@inbox.ru.

Lisovskaya Ekaterina Yuryevna. Candidate of Science in Physics and Mathematics, National Research Tomsk State University, Associate Professor, AuthorID: 863821, SPIN: 9056-4621, ORCID: 0000-0001-7345-5565, ekaterina\_lisovs@mail.ru.

Samoilov Sergey Antonovich. National Research Tomsk State University, Laboratory Assistant, ORCID: 0009-0005-8318-9885, sergei.samoilov224@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 09.08.2025; одобрена после рецензирования 29.09.2025; принята к публикации 03.10.2025.

The article was submitted 08/09/2025; approved after reviewing 09/29/2025; accepted for publication 10/03/2025.

УДК 004.81

DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.005

# Обнаружение мультимодальной депрессии с использованием многопотоковой модели Mood Insight Encoder (MMIE)

Фироз Неда<sup>1</sup>, Берестнева Ольга Григорьевна <sup>2</sup>, Аксенов Сергей Владимирович<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Томский государственный университет,

Россия, Томск, nedafiroz1910@gmail.com

<sup>2</sup>Томский политехнический университет,

Россия, Томск

Аннотация. Глобальный всплеск распространенности депрессии, которая характеризуется стойким чувством печали, незаинтересованности и снижением функциональности, подчеркивает недостатки преобладающих парадигм диагностики и лечения. Это подчеркивает настоятельную потребность в усиленных вмешательствах, учитывая недостатки, присущие традиционным подходам к диагностике депрессии. Недавние достижения в области применения искусственного интеллекта вызвали растущий интерес к разработке автоматизированных систем диагностики депрессии среди специалистов по эмоциональным вычислениям. Появление больших языковых моделей, таких, как BERT и его производные, для выявления депрессии на основе текста демонстрирует необходимость мультимодальных подходов, которые объединяют текстовые и аудиоданные модальности для достижения более точной диагностики. В этой работе авторы исследовали возможности существующих больших языковых моделей и предложили многопоточную модель Multi-Stream Mood Insight Encoder (MMIE). ММІЕ разработана для беспрепятственного использования интегрированных потоков текстовых и аудиоданных с функциями обработки с помощью кодировщика Reformer. В рамках этой концепции в кодировщик Reformer были включены такие лингвистические особенности, как абсолютистские слова и местоимения первого лица. Такой целостный подход способствовал всестороннему анализу настроения и эмоционального состояния ClinicalBERT человека. Эксперименты показали, что языковая модель превосходит производительности предложенную модель бинарной классификации депрессии. Впоследствии для диагностики депрессии были использованы значения сигмовидной мышцы модели Реформер. Используя предложенную модель, были проведены эксперименты с набором данных DAIC-WOZ. Результаты показали значительные улучшения, продемонстрировав F1 0,9538 при классификации, в то время как MAE 3,42 и RMSE 4,64 при регрессии по сравнению с самыми современными методами. Эти результаты демонстрируют эффективность предложенной модели в облегчении диагностики депрессии.

**Ключевые слова:** аудио, клинический анализ, выявление депрессии, LLMs, Реформер, MMIE

**Цитирование:** Фироз Н. Обнаружение мультимодальной депрессии с использованием многопотоковой модели Mood Insight Encoder (MMIE) / Н. Фироз, О.Г. Берестнева, С.В. Аксенов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. - № 4(40). - С. 52-77. - DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.005.

Введение. В целом, каждый пятый взрослый страдает тяжелым депрессивным расстройством (МДД), причем его распространенность растет в последнее десятилетие из-за проблем общественного здравоохранения и снижения производительности [1-2]. Серьезное депрессивное расстройство (МДД), или депрессия, определяется грустным, опустошенным или раздражительным настроением, наряду с соматическими и когнитивными изменениями, влияющими на функционирование [3]. Многочисленные демографические факторы влияют на это сложное заболевание, причины которого лучше распознаны, но существующие методы лечения недостаточны [4-5]. Автоматизация в общественном здравоохранении необходима для постановки сложных диагнозов, а диагностика на базе искусственного интеллекта обещает раннее выявление симптомов и предотвращение самоубийств [6-7]. В то время как глубокое обучение превосходно работает с большими наборами данных, традиционные модели остаются эффективными для наборов данных меньшего размера [8-10].

В ответ на растущий интерес к изучению анализа эмоций и депрессии появились базы данных, такие, как AVEC (2016, 2017, 2019). В соответствии с авторским исследованием взаимосвязи языка и психического здоровья, в различных исследованиях [11-15]

использовалась обработка естественного языка (НЛП) для прогнозирования психических расстройств. Используемый набор функций оказывает существенное влияние на эффективность моделей глубокого обучения [16].

Представление двунаправленного кодера с помощью transformers (BERT) обладает мощными возможностями извлечения признаков [17], обеспечивая самые современные результаты для задач обработки естественного языка (NLP). Предварительно обученные модели, такие, как MentalBERT, MentalRoBERTa [18], PsychBERT [19] и ClinicalBERT [20], используют общедоступные данные в соответствующих областях для извлечения текстовых признаков, широко признанных, наряду с BERT, в мультимодальной классификации эмоций [21-23]. Однако, за исключением нескольких исследований [11, 24], они не были широко использованы для этой цели. Используя наборы данных, относящиеся к психическому здоровью, эти модели были адаптированы к предметной области или доработаны специально для приложений здравоохранения.

Исследования физиологических аспектов депрессии выявили заметные различия в голосовых движениях депрессивных и здоровых людей [25-26]. Как правило, необработанные аудиоданные используются для создания изображений спектрограмм и низкоуровневых дескрипторов (LLD) для прогнозирования уровня снижения, таких показателей, как громкость, энтропия, дисперсия, асимметрия и кепстральные коэффициенты малой частоты (MFCC). [27-28].

Хотя текстовые данные дают представление о депрессивных состояниях [11], полагаться исключительно на них недостаточно, поскольку зашумленные или неполные данные могут повлиять на производительность модели. Чтобы устранить эту проблему, мультимодальная идентификация депрессии использует текстовые и слуховые данные для идентификации аффективных состояний [29]. Таким образом, в этом исследовании используются функции COVAREP [30] и FORMANT [31] для аудиоданных из набора данных DAIC-WOZ [32] и NLP для текстовых данных для диагностики депрессии, повышая точность благодаря анализу эталонного корпуса.

Толбелл предложил тщательное изучение языковых черт, характерных для депрессии, которые были представлены в 26 публикациях [33]. Меньшее внимание уделялось лингвистическим особенностям, таким, как абсолютистские слова [34] и местоимения от первого лица [33], которые указывают на их использование участниками с депрессией.

Большинство методов когнитивной терапии тревоги и депрессии рассматривают абсолютистское мышление как когнитивную ошибку. Слова или фразы, которые подразумевают абсолютную уверенность или определенность, известны, как абсолютистские слова. Они не дают большой свободы для интерпретации или различных толкований. Эти фразы часто передают идею о том, что существует только один правильный ответ или точка зрения, игнорируя сложность или противоположные идеи. Среди терминов, подпадающих под эту категорию, — "всегда", "никогда", "полностью", "тотально", "навсегда", "невозможно" и "неизбежно". Эти фразы иногда могут приводить к догматическим рассуждениям или резким точкам зрения, игнорирующим богатство и разнообразие реальных обстоятельств [34].

Предыдущие исследования в основном были сосредоточены на методах обработки естественного языка (NLP) для извлечения признаков при обнаружении депрессии на основе текста [35] и разработке моделей глубокого обучения. Однако в этих исследовательских работах не был полностью использован потенциал аудиомодальности в сочетании с языковыми моделями на основе трансформеров (LLM), а именно MentalBERT, MentalRoBERT, PsyhBERT and ClinicalBERT [36], для тщательного выделения признаков и прогнозирования мультимодальной депрессии.

Разработка универсально оптимальной модели для автоматизированной диагностики депрессии сопряжена с трудностями [37]. Основанные на тексте алгоритмы обнаружения депрессий обычно отдают предпочтение надежной модели глубокого обучения LSTM, которая устраняет проблемы исчезновения градиента, связанные с RNN, благодаря своей простой структуре и методам стробирования [38-40]. Однако последовательная сетевая структура LSTM, где каждый прямой проход зависит от результата предыдущего временного шага, создает проблемы с эффективностью для параллельной обработки [41]. Преобразователи, с другой стороны, обеспечивают параллельную обработку с использованием позиционного кодирования, устраняя недостатки LSTM в обработке последовательного ввода [42]. Техника многоголового самонаблюдения помогает распознавать важные элементы в данных [41]. Преобразователь, существенно более быстрый и экономичный по сравнению с моделями трансформеров, работает сравнительно хорошо с ними при обработке длинных последовательностей [43].

Более того, в недавних исследованиях использовались такие модели, как иерархическая сеть внимания на основе трансформеров [44]. Исключительно в таких работах, как [45], изучалась Roberta-BiLSTM и использовался [46] клинический анализ для выделения признаков и классификации депрессий; в таких исследованиях, как [45], [47] и [48], традиционные модели трансформеров сочетались с сетями LSTM для выделения признаков. Хотя большинство из них использовали модели внимания на основе трансформеров, мы рекомендуем использовать модели преобразования вместо моделей трансформеров. При обработке текстовых и аудиоданных модели Reformer работают аналогично моделям transformer, но быстрее и с меньшим потреблением памяти.

Для решения текущих задач авторы предлагают модель "Multi-Stream Mood Insight Encoder (MMIE)". Эта модель использует двухуровневый подход, объединяющий текстовые клинические функции [20] с лингвистическими функциями и потоками аудиоданных, чтобы получить всестороннее представление о настроении и эмоциональном состоянии человека, одновременно улучшая его с помощью кодировщика Reformer. Эффективное локальное самонаблюдение Reformer с механизмом локально-чувствительного хэширования (LSH) позволяет ММІЕ эффективно обрабатывать длинные последовательности данных, анализуя как короткие, так и развернутые высказывания на предмет тонких эмоциональных сигналов. Кроме того, ММІЕ включает когнитивную информацию, извлекая лингвистические шаблоны и эмоциональные выражения из текстовых данных, а также улавливая акустические особенности и просодические характеристики из аудиовходов.

Объединяя эти методы в единую структуру, ММІЕ стремится обеспечить целостную оценку депрессивных симптомов индивида, позволяя проводить точную и своевременную классификацию. Благодаря тщательному обучению и валидации набора данных DAIC-WOZ, ММІЕ стремится предложить надежный инструмент для диагностики депрессии, что в конечном итоге способствует улучшению оценки психического здоровья и стратегий вмешательства.

#### Цели и содержание исследования.

Цели исследования:

- 1) обеспечить свежий и усовершенствованный подход к классификации мультимодальных депрессий на основе текста и аудио;
- 2) изучить эффективность различных языковых моделей с сочетанием звуковых признаков для идентификации депрессии;
- 3) изучить потенциал предлагаемого метода для клинической диагностики психических расстройств.

#### Содержание исследования.

- 1) используя LLMS и модели Reformer, авторы предоставляют двухуровневые кодировки объектов для текстовой модальности; сначала авторы экспериментировали с извлечением текстовых признаков, используя четыре языковые модели: BERT [17], MentalBERT [18], MentalRoBERTa [45], PsychBERT [19] и ClinicalBERT [20]; авторы также рекомендуют вводить лингвистические характеристики в кодеры на основе Reformer; далее эти вложения затем объединяются для обнаружения депрессии на основе текста и звука с использованием модели reformer;
- 2) авторы исследовали наиболее продвинутые текстовые модели для диагностики депрессии и обнаружили, что большая языковая модель ClinicalBERT зарекомендовала себя лучше других моделей, как подходящий и экономичный способ обработки больших массивов данных в сочетании с аудиофильмами Reformer encoders; наконец, авторы продемонстрировали, что использование рекомендованного ими метода "Multi-Stream Mood Insight Encoder (MMIE)" превосходит современные работы по последнему слову техники; этот метод многообещающий для клинической диагностики психических заболеваний, насколько известно авторам, никто не проводил такого тщательного анализа:
- 3) благодаря использованию LLM ClinicalBERT в качестве первого вклада, предложенная стратегия улучшила как производительность, так и точность в задаче классификации депрессии; в довольно широком диапазоне условий модель показала себя хорошо.

Статья структурирована следующим образом: в разделе 2 анализируется существующая литература, в разделе 3 приводится методология, в разделе 4 представлены результаты, в разделе 5 – обсуждение полученных результатов, раздел 6 является заключением.

#### 1. Анализ сопутствующих работ.

**А.** Обнаружение депрессии на основе текста. Ранний скрининг на депрессию имеет решающее значение для предотвращения членовредительства и самоубийств, но современные методы сталкиваются с такими проблемами, как переоснащение модели и неточная идентификация из-за соображений конфиденциальности и ограниченности ресурсов. Огромное количество текстовых данных в социальных сетях имеет значительную практическую ценность, что побудило к недавним исследованиям их потенциала для создания автоматизированных систем обнаружения депрессии. Многочисленные исследования [14, 22, 49-58], подтверждают целесообразность использования анализа текстовых сообщений для прогнозирования депрессии. В некоторых исследованиях используются специализированные наборы данных, такие, как DAIC-WOZ [59], в то время как другие анализируют текстовые данные, полученные непосредственно из платформ социальных сетей.

От традиционных трудоемких методов извлечения текстовых объектов перешли к автоматизированным подходам, таким, как обученные встраивания Word2Vec и TF-IDF (термин, обратный частоте документа) в глубокое обучение, демонстрируя эффективность при обработке многомерных данных [14, 50]. В нескольких исследованиях используются многоуровневые, вариационные и К-конкурентные автоэнкодеры (Autoencoders) для придания особого значения снижению шума, тем самым повышая надежность модели и превосходя Word2Vec в задачах регрессии и классификации текста [51-57]. Включение линейных или нелинейных скрытых функций из автоэнкодеров повышает точность классификации, в то время как сверточные автоэнкодеры в сочетании с нейронными сетями повышают производительность в таких задачах, как MNIST и распознавание объектов [49, 58]. Используя гетерогенный график и потерю фокуса для извлечения информации из диалога, некоторые модели механизма внимания, такие, как нейронная сеть с гетерогенным графиком внимания [60], пытались идентифицировать депрессию с помощью контекстуальных

сигналов, и их оценка в наборе данных DAIC-WOZ показала, что это может помочь врачам распознать депрессию в стенограммах клинических интервью.

Модели гибридных случайных лесов на основе BERT (BERT-RF) [61] недавно были использованы для разработки функций раннего обнаружения по сообщениям в социальных сетях. Эти модели также требовали высокой точности в 99%, аналогичной моделям в исследовании [14], вносящим значительный вклад в аналитику психического здоровья.

Также были обнаружены значительные препятствия в области самостоятельного обучения представлению речи, такие, как нехватка словарного запаса и непредсказуемость длины звуковых единиц во входных высказываниях. Хотя это был многообещающий шаг, метод Хьюберта [62], уникальная фаза автономной кластеризации, которая обеспечивает выровненные целевые метки для потери прогноза, подобной BERT, оказался не очень успешным в решении этих проблем. Между тем, в области автоматического выявления депрессии недавние успехи зависят от использования больших языковых моделей, таких, как BERT, MentalBERT, MentalRoBERTa, ClinicalBERT и PsychBERT, предварительно обученных на обширных наборах данных. Эти модели свидетельствуют о переходе к более тонким и эффективным подходам к пониманию и решению проблем психического здоровья [11, 17-20, 63-64].

Предыдущие исследования показали, что модели гибридной сверточной нейронной сети (CNN) и долговременной кратковременной памяти (LSTM) эффективны для анализа текстовых данных с платформ социальных сетей с целью выявления депрессии. [39, 65]. Модели CNN и LSTM были интегрированы Вани и др. [14] для классификации депрессии на основе данных, полученных из текстов в социальных сетях. Более того, другие исследования выступали за принятие двунаправленной модели LSTM (Bi-LSTM) [13, 66].

В. Обнаружение депрессии на основе мультимодальных данных. Выявление депрессии, имеющее решающее значение в современных условиях, сопровождается ростом числа исследований, посвященных мультимодальному анализу данных. Платформа интермодального слияния для обнаружения депрессии на основе корпуса, называемая IIFDD и недавно использованная [67], объединяет внутри-модальные и интер-модальные функции для обнаружения депрессии в различных наборах данных. Здесь также предпринимались такие усилия, как [68], которые объединили аудио, видео и семантические функции для создания модели регрессии по гауссовой лестнице, в то время как в [69] использовали сеть LSTM для фиксации взаимодействия аудио- и текстовых функций для обнаружения депрессии. Примечательно, что даже с добавлением стробирующих ячеек с использованием LSTM, проблемы недостатки моделей RNN, такие, как c запоминанием ллинных последовательностей и захватом сложных зависимостей, остаются. Кроме того, поскольку каждый прямой проход зависит от результата обработки предыдущего временного шага, последовательная топология сети создает трудности для эффективных параллельных вычислений в сети LSTM. Поэтому, чтобы обойти эти проблемы и изучить особенности поведения у пациентов с депрессией, гибридные модели CNN-LSTM были обучены на мультимодальных данных, которые содержали как текст, так и аудиовходы [70, 71], хотя в некоторых мультимодальных подходах к диагностике депрессии явно использовались модели CNN, интегрирующие функции MFCC и спектрограммы, и проверенные с использованием наборов данных MODMA и RAVDESS. [72].

Учитывая необходимость объяснимости в области медицины, в [73] интегрировали модель самоконтроля с распадом GRU и оценили ее эффективность. Аналогичным образом, в [74] ввели интерпретируемую мультимодальную парадигму, основанную на характеристиках в анализе данных о здоровье, чтобы улучшить обобщение и диагностические данные для скрининга тревожности. Полученные результаты показали, что алгоритмы глубокого

обучения могут быть полезны для цифровых систем поддержки принятия решений, что может оказать положительное влияние на качество и стоимость здравоохранения.

Метод выявления депрессии без использования заранее установленных вопросников, таких, как вопросники о состоянии здоровья пациентов (PHQ-8/9), был представлен в [75], где предложена аддитивная кросс-модальная сеть внимания для анализа аудио- и текстовых данных, которые были сопоставлены с наборами данных DAIC-WOZ и EATD-Corpus.

С. Модели на основе трансформеров для обнаружения разряжения. Исследования по выявлению депрессии на основе мультимодальных данных имеют решающее значение изза распространенности депрессии, а устройства Интернета медицинских вещей предлагают полезные ресурсы данных. Другие авторы использовали дополнительные наборы данных для мультимодального распознавания эмоций, такие, как системы распознавания на основе ЭЭГ; самый последний вклад был внесен в [76]. Для распознавания эмоций на ЭЭГ в [76] создали LResCapsule, решающую проблемы с ограниченными наборами данных DEAP и DREAMER и определением пространственных объектов. В то время, как в [77] предложили интегрировать аудио-, видео- и дистанционные фотоплетизмографические сигналы (rPPG, rPPG), они сделали это, используя модули на основе трансформеров для улучшения объединения и представления объектов и deep CNNs для извлечения объектов. Через пять лет после того, как Google представила модели transformer [42], их использование распространилось на несколько областей и постоянно превосходило модели на основе LSTM [11, 15, 41, 44]. По сравнению с альтернативными архитектурными моделями, модели на основе трансформеров [11, 21, 23, 36, 41] постоянно демонстрируют более высокую производительность.

Для того, чтобы моделировать разговоры и выявлять различные психические заболевания по ходу диалога, в [22] ввели иерархический классификатор глубокой нейронной сети, основанный на внимании (LSTM). Гибридная трансформаторная сеть, содержащая ВЕRТ и Ві-LSTM, а также MLP в конце, была использована Дару и др. [47] для реализации методологии контекстуального обнаружения депрессии для идентификации текстов, наводящих на мысль о депрессии. Чтобы извлечь характеристики из последовательностей депрессивных текстов, Чжан и др. [45] одновременно использовали гибридную модель глубокого обучения Robert-BiLSTM. Существует настоятельная необходимость исследовать эти новые методы, даже несмотря на продолжающиеся попытки выявления депрессии с использованием корпуса DAIC-WOZ, которые еще не привели к этому.

Хотя модели трансформеров продемонстрировали успех в развертывании обнаружения депрессий, их ограниченность в обработке длинных последовательностей побудила рассмотреть модели преобразователей [43]. Модели Reformer значительно снижают требования к памяти по сравнению с классическими преобразователями за счет эффективной аппроксимации механизмов внимания с использованием хеширования, чувствительного к локальности (LSH). В результате возможна обработка больших наборов данных без проблем с памятью. Основанный на LSH механизм внимания Reformer models помогает лучше извлекать релевантную информацию из текста и слухового восприятия, что может помочь выявить тонкие закономерности, указывающие на депрессию. Модели Reformer могут быть более устойчивы к шуму в текстовых и аудиоданных, поскольку их процесс самоконтроля менее восприимчив к шуму и нерелевантной информации. Модели Reformer, прошедшие обучение на обширных наборах аудио- и текстовых данных, могут улучшить свои показатели на наборе данных DAIC-WOZ за счет использования обучения переносу, что повысит точность идентификации депрессии.

Для решения этих проблем авторы предлагают новую модель, которая использует кодировщик Reformer [43] для эффективного захвата зависимостей на большом расстоянии. Эта работа подчеркивает серьезность депрессии и ее последствий в ответ на настоятельную

потребность в непредвзятой и надежной модели "Multi-Stream Mood Insight Encoder (MMIE)". Чтобы решить проблемы с текстовыми расшифровками и длинными аудиозаписями для анализа, предлагаемая парадигма, поддержанная методологией, объединяет Reformer encoder. Модель значительно улучшается со средней абсолютной ошибкой (MAE) 3,421 и среднеквадратичной ошибкой (RMSE) 4,641 в наборе данных DAIC-WOZ.

#### 2. Методология исследования

2.1 Описание. Набор данных для интервью по анализу дистресса – Wizard-of-Oz (DAIC-WOZ) [32, 59] доступен на веб-сайте Института креативных технологий Университета Южной Калифорнии. Это жизненно важный ресурс для исследований аффективных вычислений и автоматизации прогнозирования проблем, связанных с психическим здоровьем. Доступны как расширенная, так и более ранняя версии наборов данных, которые были разработаны для конкурса аудиовизуальных эмоций (AVEC-2019). Они включают физиологические данные, аннотации к голосу и выражению лица, стенограммы текстовых, видео- и аудиоинтервью с людьми, испытывающими психиатрический дистресс [59, 78]. 189 сеансов в наборе данных продолжительностью от 7 до 33 минут взяты из интервью с "Волшебником страны Оз", которые проводились в контролируемой обстановке при поддержке Элли, виртуального ассистента. Набор данных содержал 189 выборок, из которых 133 были отнесены к категории "без депрессии" и 56 – "с депрессией".

2.2 Предварительная обработка данных и извлечение признаков. На первом этапе каждый раз, когда задавался новый вопрос, виртуальный ассистент Элли автоматически извлекала пары "вопрос-ответ" и связанные с ними временные метки из необработанных стенограмм. Эти временные метки облегчили разделение необработанных стенограмм на группы, каждая из которых представляла собой пару вопросов и ответов. После того, как были выделены пары "вопрос-ответ", мы использовали обработку естественного языка (NLP) для извлечения атрибутов участников. Предварительная обработка текстовых данных включала лингвистические методы, в т.ч. удаление специальных символов и стоп-слов в дополнение к преобразованию текста в нижний регистр [79]. Для подготовки данных для моделей NLP были использованы методы, включающие токенизацию, лемматизацию и стемминг. Чтобы максимизировать производительность модели, удалению стоп-слова был отдан приоритет по эффективности, за которым следовали стемминг И лемматизация. неоднозначности значения слова (WSD) и разбиение на фрагменты касались структуры предложения и двусмысленности, в то время как пометка частей речи давала синтаксическую информацию. Методы синтаксического анализа выполнялись такими модулями Python, как NLTK, spaCy, TextBlob и hero [35, 80]. Намеренное оставление вопросов без ответов во время обсуждения использовалось для сохранения контекстуального обучения и уважения автономии участников при обсуждении деликатных тем. Количество абсолютистских слов и местоимений от первого лица было получено с помощью инструментария Python NLTK toolkit. Блок-схема, иллюстрирующая предлагаемые этапы предварительной обработки данных, изображена на рисунке 1.

BERT (представления двунаправленных кодеров от Transformers), разработанные Google AI, являются одной из наиболее известных языковых моделей [17]. Теперь мы можем использовать предварительно обученные языковые модели для приложений в области психического здоровья, такие, как MentalBERT, MentalRoBERTa [18], PsychBERT [19] и ClinicalBERT [20].

Эти модели были обучены с использованием большого набора данных сообщений Reddit, связанных с психическим здоровьем. Они построены на архитектуре BERT masked language model (MLM). В этой работе авторы извлекали текстовые объекты с помощью MentalBERT, MentalRoBERTa, PsychBERT и ClinicalBERT на платформе Hugging Face. Из-за

разного объема стенограмм извлеченные атрибуты каждого участника имели разную длину. После выбора всей пары "вопрос-ответ" вместе с их временными метками авторы предварительно тщательно обработали текст в рамках предложенной методологии, выбрав каждую пару "вопрос-ответ" вместе с отметкой времени. После этого этапа авторы использовали BERT, ClinicalBERT, MentalBERT, MentalRoBERTa и PsychBERT для извлечения признаков. Кроме того, они были объединены с извлеченными языковыми элементами, такими, как местоимения от первого лица и абсолютное количество слов.

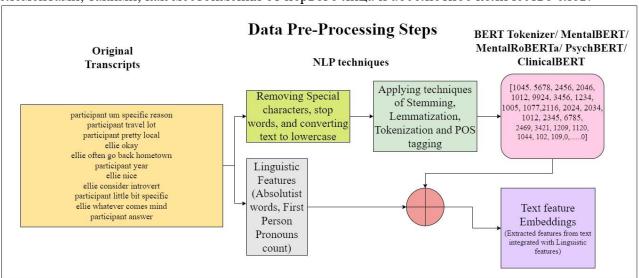


Рис. 1. Этапы предварительной обработки данных

Набор данных содержал предварительно обработанные звуковые характеристики, такие, как COVRAEP / FORMANT характеристики. (COVRAEP / FORMANT — это методы извлечения признаков.) Эти конкретные наборы звуковых функций были дополнительно объединены с извлеченными текстовыми функциями и лингвистическими характеристиками, чтобы служить окончательным тензором для ввода в предлагаемую модель.

- **2.3 Кодировщик модели Reformer.** Математическая формулировка кодировщика модели Reformer такова:
  - 1) вложения входных данных: пусть X представляет входную последовательность, состоящую из N токенов, каждый токен представлен  $d_{\text{модели}}$ . Таким образом, X представляет собой матрицу формы  $(N, d_{\text{модель}})$ ;
  - 2) позиционные вложения: аналогично оригинальному transformer, позиционные кодировки добавляются к входным вложениям для предоставления позиционной информации; пусть Р представляет матрицу позиционных кодировок формы (N, d<sub>модели</sub>), где каждая строка представляет позиционную кодировку для токена;
  - 3) вход кодирующего устройства: вход кодирующего устройства Reformer представляет собой сумму входных вложений X и позиционных кодировок:  $P: X_{\text{вход}}X + P$ ;
  - 4) обратимые слои: в отличие от стандартного преобразователя, Преобразователь использует обратимые слои для обеспечения эффективной обработки длинных последовательностей с использованием памяти; обратимый слой состоит из двух подуровней: Прямой подуровень (F); Обратимые слои; Этот слой применяет серию операций к входным данным без изменения их размера; обратимая остаточная сеть (RRN): этот уровень обратимо применяет последовательность преобразований к входным данным;
  - 5) локальный самоконтроль с локально-чувствительным хэшированием (LSH): вместо стандартного механизма самоконтроля, используемого в transformer, Преобразователь использует LSH для приближения полного самоконтроля более экономичным способом

- с использованием памяти; LSH хэширует входные векторы в сегменты и обрабатывает данные только в пределах соседних сегментов, снижая вычислительную сложность;
- 6) сеть прямой связи (FFN): каждый обратимый уровень обычно включает в себя нейронную сеть прямой связи, которая применяет нелинейное преобразование к каждому токену независимо;
- 7) нормализация слоя и остаточные соединения: нормализация слоя и остаточные соединения применяются после каждого обратимого слоя для стабилизации обучения и облегчения градиентного потока.

Математически преобразователь кода можно представить в виде серии обратимых уровней:

$$X_{\text{вход}} = X + P \tag{1}$$

$$X_{выход} = преобразователь преобразователя (X_{вход})$$
 (2)

$$X_{BMXOI} = F(RRN(X_{BXOI})) \tag{3}$$

где  $X_{выход}$  представляет выходной сигнал преобразователя, а F и RRN представляют операции, выполняемые в пределах каждого обратимого уровня.

2.4 Предлагаемая **MMIE** модель. Авторы предлагают новый подход персонализированному выявлению депрессии с использованием аудио- и текстовых модальностей: гибридную модель глубокого обучения, основанную на клинической модели Reformer, настроенной на основе Alberta. Она воплощает в себе архитектуру нейронной сети, которая использует возможности сетей Reformer наряду с обширными языковыми методологиями извлечения признаков. Значимые текстовые элементы были извлечены с помощью LLMS и объединены вместе с лингвистическими и звуковыми элементами перед подачей в качестве входных данных в модель Reformer. Авторы обнаружили, что клинический анализ был наиболее успешным методом. Текстовые функции, полученные из больших языковых моделей, лингвистические функции и аудиоданные были обработаны с помощью Reformer encoder для создания кодировок на основе reformer. Технологическая схема предлагаемой модели изображена на рисунке 2.

#### 2.5 Алгоритм.

Ввод:

Представления функций:

 $X^{i}_{\text{BERT}}$  извлечен из варианта і BERT (где і означает BERT, MentalBERT, MentalRoBERTa, PsychBERT ИЛИ ClinicalBERT).

Х<sub>аудио</sub>, извлеченное из аудиоданных (COVAREP и ФОРМАНТ).

Х<sub>лингвистический</sub> для лингвистического признака.

Изучаемые веса:

 $X^{\dot{1}}_{\text{BERT}}$ ,  $X_{\text{аудио}}$  и  $X_{\text{лингвистический}}$  для каждого типа объектов.

Объединение:

$$X_{concat} = (X_{BERT}^1, X_{MentalBERT}^2, \dots N J N \dots X_{ClinicalBERT}^5) + X_{аудио} + X_{лингвистика}$$

Reformer-based LSH Attention:

 $F_{Reformer} = ReformerLSHAttention(X_{объединение})$ 

Результат:

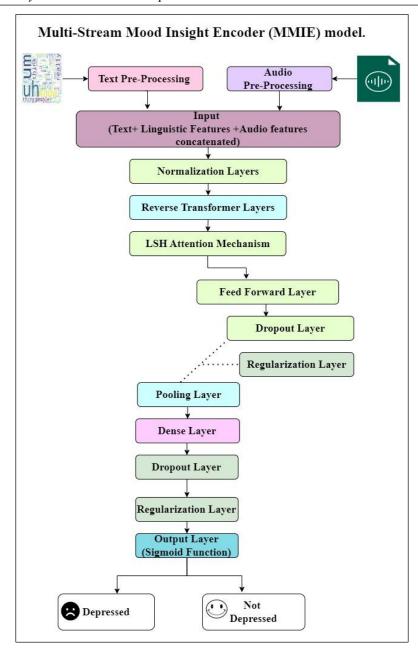
Классификация депрессии:

 $\hat{y} = K$ лассификатор $(F_{Reformer})$ 

где классификатор представляет собой классификатор, обученный с использованием  $F_{Reformer}$  в качестве входных признаков для классификации депрессий,

у = классификационная метка депрессии;

 $\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{m}$ етка классификации прогнозируемой депрессии.



**Рис. 2.** Блок-схема модели обратного трансформера: многопоточная модель Mood Insight Encoder (MMIE).

**2.6** Экспериментальные показатели обучения и оценки. Предложенная модель обучалась на графическом процессоре, что повысило вычислительную эффективность. Процесс обучения включал 200 итеративных периодов обучения. Таблица 1 иллюстрирует экспериментальную установку, использованную в нашем исследовании.

Таблица 1. Экспериментальная установка

Используемое аппаратное и программное обеспечение	Технические характеристики
GPU	NVIDIA GeForce RTX 2080 SUPER
RAM	128 ГБ
OS	Windows 11/ Linux
Язык программирования	Python

Авторы оптимизировали производительность модели, скорректировав гиперпараметры с использованием методов поиска по сетке, и использовали RMSProp optimizer для лучшей

оптимизации модели; чтобы обеспечить обобщаемость и предотвратить переобучение, также использовалась процедура ранней остановки регуляризации. Распространение среднеквадратичного значения, или оптимизатор RMSProp, и алгоритм градиентного спуска с импульсом были сопоставимы. Колебания в вертикальной плоскости были ограничены оптимизатором RMSProp. Поскольку это может ускорить обучение, предложенный авторами алгоритм может выполнять большие горизонтальные шаги и быстрее достигать сходимости.

Градиентный спуск отличался от RMSProp способом расчета градиентов. Каждый вес в сети изучался с разной скоростью в результате того, что градиент нормировался на знаменатель алгоритма обновления веса. Это может смягчить проблемы, связанные с другими стратегиями оптимизации на основе градиента, такими, как исчезновение или разрыв градиентов.

Политика обновления RMSProp определяется:

$$S_{dw} = \beta S_{dw} + (1 - \beta) dw^{2}$$
 (4)  
$$W = W - \alpha \frac{dw}{\sqrt{S_{dw}}}$$
 (5)

где:

 $S_{dw}$  = скользящее среднее квадрата градиента.

 $\beta$  = коэффициент забывания.

 $d_{w}$  = градиент функции потерь, зависящей от веса.

 $\alpha =$ скорость обучения.

W = параметр веса.

Для оценки результатов использовались три показателя точности – F1, Precision и Recall. Более высокий показатель точности означал улучшение характеристик модели. Поведение регрессионной модели было дополнительно исследовано с использованием результатов средней абсолютной ошибки (MAE) и среднеквадратичной ошибки (RMSE).

Точность (A) = 
$$\frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN}$$
 (6)  
Точность (P) =  $\frac{TP}{TP+FP}$  (7)  
Вспомнить (R) =  $\frac{TP}{TP}$  (8)

Точность (P) = 
$$\frac{TP}{TP+FP}$$
 (7)

Вспомнить (R) = 
$$\frac{TP}{TP+FN}$$
 (8)

Вспомнить (R) = 
$$\frac{TP}{TP+FN}$$
 (8)  
Оценка F1 =  $\frac{2*Tочность*Припоминание}{точности+Припоминание}$  или  $\frac{2*TP}{2*TP+FP+FN}$  (9)

где TP = истинно положительный результат, TN= истинно отрицательный результат,

FP = ложноположительный результат и FN = ложноотрицательный

Средняя абсолютная погрешность (МАЕ): 
$$=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i-\hat{y}_i)$$
 (10) среднеквадратичная ошибка (МSE):  $=\frac{1}{n}*\sum_{i=1}^{n}(y_i-\hat{y}_i)^2$  (11)

среднеквадратичная ошибка (MSE): 
$$=\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{y}_i)^2$$
 (11)

где n = количество наблюдений в наборе данных.

 $y_i$  = фактическое значение  $i^{-10}$  наблюдения.

 $\hat{\mathbf{v}}_i$ = прогнозируемое значение  $\mathbf{i}^{-\text{го}}$  наблюдения.

3. Результаты. Авторы провели серию экспериментов по объединению текстовых функций на основе BERT со звуковыми функциями, чтобы оценить их эффективность и воспользоваться возможностями, встроенными в кодировщики Reformer с глубоким обучением (DL). Эффективность предлагаемого метода систематически оценивалась с использованием набора данных DAIC\_WOZ, состоящего из двух наборов по 10 экспериментов в каждом. Испытания, которые соответствовали элементам из BERT, MentalBERT, MentalRoBERTa, PsychBERT и ClinicalBERT, были названы моделями, основанными на реформерах (Reformers). Подробное описание результатов этих исследований приведено в таблицах 2, 3.

**Таблица 2.** Результаты тестирования для LLM и классификации звуковых функций для обнаружения депрессии в DAIC-WOZDAIC-WOZ

LLM	F1	Precision	Recall	MAE	RMSE
BERT	0,8471	0,8410	0,8614	6,84	10,86
BERT + Аудио (COVAREP + ФОРМАНТ)	0,8615	0,8511	0,8781	6,42	9,97
MentalBERT	0,8575	0,8556	0,8614	5,98	7,98
MentalBERT + Аудио (COVAREP + FORMANT)	0.8962	0.8925	0.9021	5.23	7.21
MentalRoBERTa	0.8676	0.8501	0.8896	4.26	7.26
MentalRoBERTa + Аудио (COVAREP + FORMANT)	0.9054	0.9001	0.9105	3.68	6.06
PsychBERT	0.9066	0.9025	0.9101	6.71	9.52
PsychBERT+ Аудио (COVAREP + FORMANT)	0.9144	0.9110	0.9214	5.44	7.32
ClinicalBERT	0.9288	0.9310	0.9296	3.68	5.01
ClinicalBERT+ Аудио (COVAREP + FORMANT)	0.9538	0.9499	0.9574	3.42	4.64

Таблица 3. Гиперпараметрическая оптимизация предлагаемой модели

MentalBERT, MentalRoBERTa, PsychBERT, ClinicalBERT +аудио характеристики (COVAREP + FORMANT)				
Layer Name	Parameter Settings			
Input Size (Text +Audio)	786+ 1684			
Optimizer	RMSprop			
Learning Rate	0.001			
Batch Size	256			
Epochs	200			
Regularization (L2)	0.001			
Dropout Rate	0.2			
Number of Dense Layers	4			
Number of Reverse Transformer Layers	2			
Number of Locality-Sensitive Hashing (LSH) Attention	2			
Units in Dense Layers	512, 16, 256, 256			
Activation Function in Dense Layers	ReLU			

Units in Output Layer	1
Activation Function in Output Layer	Sigmoid
Early Stopping	Yes
Early Stopping Monitor	Validation Loss
Early Stopping Patience	3

- 5. Обсуждение. Авторы оценили производительность предложенной ими модели с помощью набора для разработки DAIC-WOZ. Результаты, как показано в таблицах 2-5, показывают, насколько хорошо работала модель по сравнению с базовым уровнем и другими подходами. Прежде всего, предложенная авторами модель превзошла методы, предложенные в более ранних исследованиях. Сравнивая его с базовым экспериментом против Ореши и др. [12] и семью тщательно подобранными методологиями из литературы методами, которые были выбраны за их лучшую производительность или совместимость с нашим экспериментальным подходом, авторы эмпирически сравнили предложенную модель с ними в наборе данных DAIC. Результаты других моделей взяты из соответствующих оригинальных исследований:
  - 1) Ореши и др. [12] предложили многозадачную модель обучения, которая использует общий уровень LSTM для отличия депрессии от мультимодальных данных;
  - 2) Фан Х. и др. [77] извлекли необходимые высокоуровневые видео- и аудиофункции с использованием глубоких сверточных нейронных сетей (CNN), и окончательные задачи обнаружения депрессии были реализованы путем подачи представлений функций всех модальностей в сеть многослойного персептрона (MLP);
  - 3) Лин и др. [81] рекомендовали использовать двунаправленную сеть долговременной кратковременной памяти (Bi-LSTM) со слоем внимания для обработки лингвистического контента, полностью подключенную сеть, интегрирующую выходные данные предыдущих двух моделей для оценки депрессивного состояния, и одномерную сверточную нейронную сеть (1D-CNN) для обработки речевых сигналов;
  - 4) Сан Г. и др. [82] предложили неконтролируемый автоэнкодер на основе трансформаторов для разработки встраиваний на уровне предложений из аудиовизуальных функций на уровне кадра; они также предложили сеть глубокого объединения функций, использующую кросс-модальный преобразователь для интеграции текстовых, аудио- и видеофункций;
  - 5) Ийортсуун, Н. и др. [75] использовали как аудио, так и текстовые данные, предложив аддитивную сеть кросс-модального внимания для изучения и подбора соответствующих весов, которые наилучшим образом отражают кросс-модальные взаимодействия и взаимосвязи между обеими функциями, используя Bi-LSTM в качестве основы обеих модальностей;
  - 6) Ли, М. и др. [60] создали гетерогенный граф (DSE-HGAT), используя исключительно текстовую модальность, моделируя депрессивное состояние участника и объединяя фрагменты депрессивных подсказок с использованием сети graph attention network;
  - 7) Илиас Л. и др. [11] предложили метод, в котором использовался вентиль мультимодальной адаптации для создания комбинированных вложений, которые затем загружаются в модель BERT (или MentalBERT);
  - 8) Дас А. и др. [72] применили мультимодальный подход объединив функции МFCC, а также функции спектрограммы, извлеченные из аудиофайла, с помощью новой сети CNN;

- 9) J. Ye. и др. [84] аудиовизуальная мамба с прогрессивным слиянием для выявления мультимодальной депрессии, получившая название DepMamba;
- 10) результаты классификации обнаружения разрежения с использованием различных LLM, звуковых функций и эффективного преобразователя с обратным преобразованием, называемого Reformer, показаны в таблице 2; гиперпараметры модели Реформера, которые были определены для получения этих результатов, перечислены в таблице 3. Авторы оптимизировали производительность модели, скорректировав гиперпараметры с использованием подходов поиска по сетке.

**Таблица 4.** Сравнение с предыдущими работами по выявлению депрессии как проблемы регрессии

Существующие модели, подходы,	Применяемые методы	MAE	RMSE
Исходные данные Оуреши, С. А. и др. [12]	Мультимодальны общий слой LSTM фьюжн	3.49	4.71
Фан, Х. и др. [77]	CNN+ трансформатор на основе модели	7.05	9.45
Лин и др. [81]	аудио + текст, Bi-LSTM модель	3.88	5.44
Сан, Г. и др. [82]	мультимодальны DDFN	3.78	5.35
Ийортсуун, Н. и др. [75]	Additive Cross-Modal Attention Network (ACMA)	4.65	/
Наша модель только с текстом и реформаторскими моделями	ClinicalBERT + Reformer Encoder и классификатором	3.684	5.019
Наша модель с текстовой и аудиомодальностью и классификатором Reformer Encoder	ClinicalBERT +Reformer Encoder и классификатором	3.421	4.641

**Таблица 5.** Сравнение с предыдущими работами по выявлению депрессии как classification problem

Существующие модель-	Применяемые методы	F1	Точность	Вспомнить
ные подходы				
Лин и др. [81]	Аудио + текст, модель Bi- LSTM	0.83	0.83	0.83
Сан, Г. и др. [82]	Мультимодальный, DDFN	0.89	0.91	
Ийортсуун, Н. и др. [75]	Additive Cross-Modal Attention Network (ACMA)	0,82	0,79	0,86
Ли, М. и др. [60]	Текст, DSE-HGAT	0.79	0.79	0,80
Илиас, Л. и др. [11]	M-MentalBERT (top2vec)	93,06	96,12	90,18
Дас, А. и и др [72]	CNN	0,89	0,93	0,85
Предлагаемая модель с текстом единственный и Модели Реформер	ClinicalBERT + Reformer Encoder and Classifier			

Предлагаемая модель с	ClinicalBERT +Reformer	0.95	0.94	0.95	
текстовой и	<b>Encoder and Classifier</b>				
аудиомодальной					
модальностью и					
классификатором					
Reformer Encoder					

**Исследование абляции.** Чтобы подтвердить эффективность каждого модуля в модели авторов, проведены эксперименты по абляции с различными комбинациями модулей:

- Когда звуковые функции не доступны в модели Reformer, текстовые функции извлекаются непосредственно из LLMS и затем загружаются в модель Reformer. Использование функций аудио в сочетании с кодировщиком Reformer, использующим локально-зависимое хэширование (LSH), значительно улучшило MAE с 6,84 до 6,42 и RMSE с 10,86 до 9,97 в случае модели BERT только до модели BERT + Audio (COVAREP + FORMANT). Другие модели с различными LLMSS также показали аналогичные результаты; например, модель MentalRoBERTa с аудиокомпонентами существенно превзошла другие модели в исследованиях. Наилучшие результаты были получены при значениях МАE, которые улучшились с 3,68 до 3,42, и значениях RMSE с 5,01 до 4,64 при использовании модуля ClinicalBERT.
- Это еще раз подчеркивает преимущества мультимодальных признаков для классификации депрессии. Классификатор Reformer с текстом и звуком (COVAREP + FORMANT) неизменно превосходил текстовые функции, демонстрируя эффективность этой комбинации. Применяя эту тактику, ClinicalBERT добился максимальной производительности по всем направлениям. Результаты эксперимента еще раз подтверждают успех усилий авторов по кодированию объектов, подчеркивая совокупную эффективность кодировщиков Reformer в LLM для исследования корпусов, а также звуковых и лингвистических характеристик. Однако модели Reformer, возможно, по своей природе не способны улавливать долгосрочные временные корреляции, особенно при работе с текстовыми и аудиоданными модальностями. При объединении и использовании данных, как из текстовых, так и из аудиальных источников модели Reformer могут столкнуться с трудностями. Чтобы обойти требование объединения объектов во время обучения модели, авторы объединили объекты с помощью простой конкатенации.
- В таблице 3 приведены результаты гиперпараметрической оптимизации, в то время как в таблицах 4 и 5 представлено сравнение производительности модели. Оптимальные конфигурации гиперпараметров, определяемые с точки зрения максимальной точности классификации, включают настройку модуля LSH attention с двумя модулями и установку размера пакета на 256. Эти результаты свидетельствуют о том, что механизм внимания LSH способствует повышению точности классификации модели. Кроме того, наблюдаемые улучшения производительности подразумевают, что модель способна эффективно обрабатывать большие объемы данных и захватывать сложные шаблоны с использованием аппаратного обеспечения GPU с механизмом внимания LSH.

**Контраст по отношению друг к другу.** Подробное сравнение всех моделей, использованных для решения задачи, можно найти в таблицах 4 и 5. Базовая модель продемонстрировала довольно низкие показатели производительности при использовании метода ансамбля. С точки зрения МАЕ и RMSE модель авторов показала себя немного лучше, чем Оуреши и др. [12]. Более того, по показателям МАЕ, RMSE, точности, отзыва и F1 модель авторов превзошла Лин и др. [81]. Она также превосходит Сан, Г. и др. [82] и Ли, М. и др. [60] с точки зрения метрики F1, точности и отзыва. Несмотря на достижение впечатляющих

показателей текстовой модальности и очень высокой точности, Илиасу и др. [11] не хватало информации о МАЕ и RMSE, которые важны для оценки регрессионных задач, таких, как прогнозирование тяжести депрессии. Хотя они также получили очень высокую точность, Дас, А. и др. [72] не соответствовали требованиям МАЕ и RMSE модели авторов. Удивительно, но большинство ранее раскрытых базовых методологий, за исключением нескольких недавних работ, таких, как Илиас и др., 2023 [11], не содержали лингвистических функций для текстовых моделей или обнаружения мультимодальных депрессий. Чтобы обеспечить полное представление и подчеркнуть недостаточное использование кодеров Reformer, модель авторов сочетает в себе функции кодированных представлений, а именно абсолютистские слова. Интеграция лингвистических функций, возможно, также способствовала повышению производительности нашей модели. Авторы перешли с оптимизатора Adam на RMSProp (среднеквадратичное распространение), чтобы более эффективно обновлять параметры модели во время обучения.

Обобщение модели. Авторы оценили свою модель с использованием LIME (local interpretable model-agnostic explanations), чтобы получить более надежную оценку ее эффективности. LIME – это метод для прояснения предсказаний любой модели "черного ящика", включая модели Реформер. Несмотря на то, что существует компромисс между эффективностью и прозрачностью моделей машинного обучения, попытки уточнить параметры обученной модели или веса, связанные с особенностями, тем не менее, могут способствовать лучшему пониманию моделей. Многие исследователи использовали LIME, потому что он позволяет получать данные, которые легко и быстро понять [83]. На рисунке 3 показано объяснение одного из модулей модели для предсказаний, сделанных авторской моделью с использованием LIME. Отлаженный на основе крупномасштабных клинических заметок, ClinicalBERT использует контекстуальные вложения, адаптированные к предметной области, для надежного обобщения различных клинических описаний тяжести депрессии. Объединяя текстовые вложения ClinicalBERT с низкоуровневыми акустическими характеристиками (например, показателями COVRAEP / FORMANT) в мультимодальной основе LSTM, фиксирует дополнительные модель биомаркеры лингвистической и просодической депрессии, улучшая обобщение в зависимости от условий записи и говорящих.

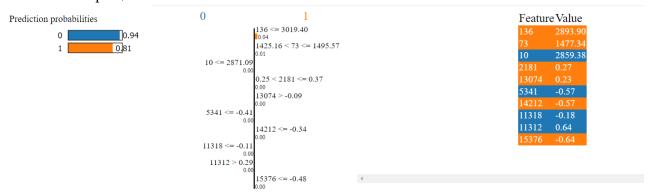


Рис. 3. Этапы предварительной обработки данных

Отчет о десятикратной категоризации, созданный с использованием предложенной методологии, также представлен в таблице 6.

**Таблица 6.** Сравнение с предыдущими работами по выявлению депрессии как проблеме классификации

Сложите	Государственной	Точности	Вспомнить	Ф1	
1	В Депрессию	0.89	0.97	0.93	

	Номера-Депрессия	0.93	0.91	0.92
2	Депрессию	0.91	0.94	0.92
	Номера-Депрессия	0.98	0.94	0.96
3	Депрессию	0.96	0.97	0.97
	Номера-Депрессия	0.98	0.96	0.97
4	Депрессию	0.95	0.96	0.95
	НомераДепрессия	0.94	0.98	0.96
5	Депрессию	0.90	0.92	0.91
	Номера-Депрессия	0.97	0.92	0.95
6	Депрессии	0.97	0.96	0.96
	Номера-Депрессия	0.98	0.95	0.96
7	Депрессии	0.95	0.96	0.95
	Номера-Депрессия	0.89	0.97	0.93
8	Депрессии	0.97	0.91	0.94
	НомераДепрессия	0.91	0.98	0.94
9	Депрессии	0.99	0.98	0.99
	Номера-Депрессия	0.91	1.00	0.95
10	Депрессия	0.96	0.94	0.95
	Номера-Депрессия	0.96	0.91	0.94
Означает	Депрессию	0.94	0.95	0.95
	Номера-Депрессия	0.94	0.94	0.95

Анализ соглашений. Анализ соответствия авторской модели дал точность обучения 94,75% и точность тестирования 95,32%. Авторы продемонстрировали примечательные результаты, оцениваемые по всем базовым показателям на указанных подтверждающих наборах, что дало оценку F1, точности и отзыва 0,9538, 0,9499 и 0,9574 соответственно. Действительно пониженные метки и прогнозы модели показывают значительную степень согласия, на что указывает значение каппа 0,717 и значение р менее 0,01. Кроме того, модель авторов улучшила показатели оценки МАЕ на 0,069 по сравнению с базовой моделью Оуреши и др. [12], которая использовала модели transformer, в то время как авторы использовали BERT и specific LLM for mental health, которые также являются моделями на основе transformer. Авторы считают, что повышение производительности произошло из-за использования промежуточного уровня кодировщика Reformer, который интегрировал синтаксические, семантические данные и сведения о говорящих, извлеченные из уровня LLM, и объединил их с лингвистическими функциями. Эти важные выводы имеют решающее значение для понимания их роли в анализе и классификации текстов. В частности, в сочетании с ClinicalBERT они превосходно помогают извлекать контекстно-зависимые функции из текста, еще повышая их эффективность.

Заключение. Тяжелое депрессивное расстройство (МДД) в настоящее время поражает значительную часть населения земного шара. В этой статье анализируется и предлагается уникальная методология — модель "Multi-stream mood insight encoder (ММІЕ)", которая потенциально позволяет добиться значительных успехов в выявлении мультимодальной депрессии. Рекомендуемый подход ММІЕ является эффективным методом, который имеет перспективы для клинического выявления проблем с психическим здоровьем. Это первое исследование, в котором применяется стратегия кодирования функций, сочетающая звуковые

функции на основе COVRAEP и FORMANT с такими функциями, как absolutist words для полного представления, и предварительно обученный LLM под названием ClinicalBERT. Специальный кодировщик Reformer, который разработали авторы, используется в исследовании для классификации депрессии. Используя этот новый подход, авторы надеются внести значительный вклад в решение проблемы выявления депрессии, предоставив точку зрения для понимания и лечения этой распространенной проблемы психического здоровья.

Авторская модель, основанная на Реформере, потенциально обладает лучшей обобщаемостью, из-за ее способности фиксировать долгосрочные зависимости в текстовых и аудиоданных, что может иметь решающее значение для выявления тонких лингвистических маркеров депрессии. Включение аудиоданных (ClinicalBERT + кодировщик Reformer и классификатор с текстовой и аудио-модальной модальностью) в авторскую модель привело к значительному улучшению всех показателей по сравнению с текстовой версией. Это говорит о том, что модель эффективно извлекла уроки из обеих модальностей, потенциально приводя к более полному пониманию депрессии. Однако одним из недостатков является то, что количество и качество используемых обучающих данных может производительность всех моделей, включая авторскую. Для более надежного сравнения необходимы исследования с использованием более крупных и разнообразных наборов данных на языках, отличных от англоязычных корпусов.

Предложенная авторами многопоточная модель "multi-stream mood insight encoder (ММІЕ)" продемонстрировала многообещающую эффективность для классификации депрессии, особенно в сочетании с клиническими даннымиТ и аудиоданными. Они преуспели в извлечении контекстно-зависимых функций из текстовых и звуковых модальностей, что еще больше повысило их эффективность. Это обеспечило полезный подход, который может найти применение в клинических ситуациях. Это исследование имеет важное значение в постоянных усилиях по улучшению диагностики и терапии психического здоровья, о чем свидетельствуют продемонстрированные улучшения точности и надежной работы.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность лицензии DAIC\_WOZ dataset, которая значительно облегчила исследовательские усилия. Кроме того, авторы признательны библиотеке Томского государственного университета за то, что она предоставила авторам доступ к широкому спектру ценных ресурсов. «Исследование выполнено при поддержке гранта Правительства Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2025-009 от 28 февраля 2025 г.)».

#### Список источников

- 1. Institute of Health Metrics and Evaluation. Global health data exchange (GHDx). 2021.
- 2. Twenge J.M., Cooper A.B., Joiner T.E., et al. Age, period, and cohort trends in mood disorder indicators and suicide-related outcomes in a nationally representative dataset, 2005–2017. Journal of abnormal psychology, 2019, vol. 128, no. 3, pp. 185–199, DOI: 10.1037/abn0000410.
- 3. Diagnostic and statistical manual of mental disorders. 5th ed. American psychiatric association, 2013.
- 4. Nestler E.J., Barrot M., DiLeone R.J., et al. Neurobiology of Depression. Neuron, 2002, vol. 34, no. 1, pp. 13–25, DOI: 10.1016/S0896-6273(02)00653-0.
- 5. Cohen K. Absolutist thinking and depression, 2019.
- 6. Blazer D.G. Psychiatry and the oldest old. American journal of psychiatry, 2000, vol. 157, no. 12, pp. 1915–1924, DOI: 10.1176/appi.ajp.157.12.1915.
- 7. Zarate C.A., et al. A Randomized Trial of an N-methyl-D-aspartate Antagonist in treatment-resistant major depression. Archives of general psychiatry, 2006, vol. 63, no. 8, p. 856, DOI: 10.1001/archpsyc.63.8.856.
- 8. Chattopadhyay S. A neuro-fuzzy approach for the diagnosis of depression. Applied Computing and Informatics, 2017, vol. 13, no. 1, pp. 10–18, DOI: 10.1016/j.aci.2014.01.001.
- 9. Joshi M.L., Kanoongo N. Depression detection using emotional artificial intelligence and machine learning: A closer review. Materials Today: Proceedings, 2022, vol. 58, pp. 217–226, DOI: 10.1016/j.matpr.2022.01.467.
- 10. Miao X., Li Y., Wen M., Liu Y., et al. Fusing features of speech for depression classification based on higher-order spectral analysis. Speech Communication, 2022, vol. 143, pp. 46–56, DOI: 10.1016/j.specom.2022.07.006.

- 11. Ilias L., Mouzakitis S., Askounis D. Calibration of transformer-based models for identifying stress and depression in social media. IEEE Transactions on computational social systems, 2023, pp. 1–12, DOI: 10.1109/TCSS.2023.3283009.
- 12. Oureshi S.A., Dias G., Saha S., Hasanuzzaman M. Gender-aware estimation of depression severity level in a multimodal setting. 2021 International joint conference on neural networks (IJCNN), IEEE, 2021, pp. 1–8, DOI: 10.1109/IJCNN52387.2021.9534330.
- 13. Firoz N., Beresteneva O.G., Vladimirovich A.S., et al. Automated text-based depression detection using hybrid ConvLSTM and Bi-LSTM model. 2023 Third International conference on artificial intelligence and smart energy (ICAIS). IEEE, 2023, pp. 734–740, DOI: 10.1109/ICAIS56108.2023.10073683.
- 14. Ahmad Wani M., ELaffendi M.A., Shakil K.A., et al. Depression screening in humans with AI and deep learning techniques. IEEE Transactions on computational social systems, 2023, vol. 10, no. 4, pp. 2074–2089, DOI: 10.1109/TCSS.2022.3200213.
- 15. Mazumdar H., Chakraborty C., Sathvik M., et al. GPTFX: A Novel GPT-3 based framework for mental health detection and explanations. IEEE Journal of biomedical and health informatics, 2023, pp. 1–8, DOI: 10.1109/JBHI.2023.3328350.
- 16. Meng Q., Catchpoole D., Skillicom D., et al. Relational autoencoder for feature extraction. 2017 International Joint conference on neural networks (IJCNN), IEEE, 2017, pp. 364–371, DOI: 10.1109/IJCNN.2017.7965877.
- 17. Devlin J., Chang M.-W., Lee K., Toutanova K. BERT: pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding, 2018, DOI: 10.48550/arXiv.1810.04805.
- 18. Ji S., Zhang T., Ansari L., Fu J., et al. MentalBERT: publicly available pretrained language models for mental healthcare. Proceedings of the language resources and evaluation conference (LREC), 2022, DOI: 10.48550/arXiv.2110.15621.
- 19. Vajre V., Naylor M., Kamath U., et al. PsychBERT: a mental health language model for social media mental health behavioral analysis. 2021 IEEE International conference on bioinformatics and biomedicine (BIBM), 2021, pp. 1077–1082, DOI: 10.1109/BIBM52615.2021.9669469.
- 20. Huang K., Altosaar J., Ranganath R. ClinicalBERT: modeling clinical notes and predicting hospital readmission, 2019.
- 21. Saha T., Ramesh Jayashree S., Saha S., et al. BERT-caps: a transformer-based capsule network for tweet act classification. IEEE Transactions on computational social systems, 2020, vol. 7, no. 5, pp. 1168–1179, DOI: 10.1109/TCSS.2020.3014128.
- 22. Saha T., Reddy S.M., Saha S., et al. Mental health disorder identification from motivational conversations. IEEE Transactions on computational social systems, 2023, vol. 10, no. 3, pp. 1130–1139, DOI: 10.1109/TCSS.2022.3143763.
- 23. Li M., et al. TrOCR: Transformer-based optical character recognition with pre-trained models. Proceedings of the AAAI conference on Artificial Intelligence, 2023, vol. 37, no. 11, pp. 13094–13102, DOI: 10.1609/aaai.v37i11.26538.
- 24. Anindyaputri N.A., Girsang A.S. A Comparative study of deep learning models for detecting depressive disorder in tweets. Journal of system and management sciences, 2024, vol. 14, no. 3, DOI: 10.33168/JSMS.2024.0318.
- 25. Flint A.J., Black S.E., Campbell-Taylor I., et al. Abnormal speech articulation, psychomotor retardation, and subcortical dysfunction in major depression. Journal of psychiatric research, 1993, vol. 27, no. 3, pp. 309–319, DOI: 10.1016/0022-3956(93)90041-Y.
- 26. Korszun A. Facial pain, depression and stress connections and directions. Journal of oral pathology & medicine, 2002, vol. 31, no. 10, pp. 615–619, DOI: 10.1034/j.1600-0714.2002.00091.x.
- 27. He L., Cao C. Automated depression analysis using convolutional neural networks from speech. Journal of biomedical informatics, 2018, vol. 83, pp. 103–111, DOI: 10.1016/j.jbi.2018.05.007.
- 28. Dong Y., Yang X. A hierarchical depression detection model based on vocal and emotional cues. Neurocomputing, 2021, vol. 441, pp. 279–290, DOI: 10.1016/j.neucom.2021.02.019.
- 29. Zheng W., Yan L., Wang F.-Y. Two birds with one stone: knowledge-embedded temporal convolutional transformer for depression detection and emotion recognition. IEEE Transactions on affective computing, 2023, vol. 14, no. 4, pp. 2595–2613, DOI: 10.1109/TAFFC.2023.3282704.
- 30. Degottex G., Kane J., Drugman T., et al. COVAREP A collaborative voice analysis repository for speech technologies. 2014 IEEE International conference on acoustics, speech and signal processing (ICASSP), 2014, pp. 960–964, DOI: 10.1109/ICASSP.2014.6853739.
- 31. Kim J.C., Clements M.A. Formant-based feature extraction for emotion classification from speech. IEEE 2015 38th International conference on telecommunications and signal processing (TSP), 2015, pp. 477–481, DOI: 10.1109/TSP.2015.7296308.

- 32. Ringeval F., et al. AVEC'19. Proceedings of the 27th ACM international conference on multimedia. New York, NY, USA: ACM, 2019, pp. 2718–2719, DOI: 10.1145/3343031.3350550.
- 33. Tølbøll K.B. Linguistic features in depression: a meta-analysis. Journal of Language Works Sprogvidenskabeligt Studentertidsskrift, 2019, vol. 4, no. 2, pp. 39–59, available at: https://tidsskrift.dk/lwo/article/view/117798
- 34. Al-Mosaiwi M., Johnstone T. In an absolute state: elevated use of absolutist words is a marker specific to anxiety, depression, and suicidal ideation. Clinical psychological science, 2018, vol. 6, no. 4, pp. 529–542, DOI: 10.1177/2167702617747074.
- 35. Bird S., Klein E., Loper E. Natural language processing with Python: analyzing text with the natural language toolkit. O'Reilly Media, Inc., 2009.
- 36. Malhotra A., Jindal R. XAI transformer-based approach for interpreting depressed and suicidal user behavior on online social networks. Cognitive systems research, 2023, p. 101186, DOI: 10.1016/j.cogsys.2023.101186.
- 37. Mitra V., et al. The SRI AVEC-2014 Evaluation System. Proceedings of the 4th international workshop on audio/visual emotion challenge, New York, NY, USA: ACM, 2014, pp. 93–101, DOI: 10.1145/2661806.2661818.
- 38. Shi X., et al. Convolutional LSTM network: a machine learning approach for precipitation nowcasting. 2015.
- 39. Amanat A., et al. Deep learning for depression detection from textual data. Electronics, 2022, vol. 11, no. 5, p. 676, DOI: 10.3390/electronics11050676.
- 40. Akter M.S., Shahriar H., Cuzzocrea A. A Trustable LSTM-autoencoder network for cyberbullying detection on social media using synthetic data, 2023, DOI: 10.48550/arXiv.2308.09722.
- 41. Lu J., et al. Prediction of depression severity based on transformer encoder and CNN Model. IEEE, 2022 13th International symposium on Chinese spoken language processing (ISCSLP), 2022, pp. 339–343, DOI: 10.1109/ISCSLP57327.2022.10038064.
- 42. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., et al. Attention is all you need, 2017, DOI:10.48550/arXiv.1706.03762.
- 43. Kitaev N., Kaiser Ł., Levskaya A. Reformer: the efficient transformer, 2020, DOI: 10.48550/arXiv.2001.04451.
- 44. Mallol-Ragolta A., Zhao Z., Stappen L., et al. A Hierarchical attention network-based approach for depression detection from transcribed clinical interviews. Interspeech 2019, ISCA, 2019, pp. 221–225, DOI: 10.21437/Interspeech.2019-2036.
- 45. Zhang Y., He Y., Rong L., Ding Y. A hybrid model for depression detection with transformer and bi-directional long short-term memory. 2022 IEEE International conference on bioinformatics and biomedicine (BIBM), 2022, pp. 2727–2734, DOI: 10.1109/BIBM55620.2022.9995184.
- 46. Cheligeer C., et al. BERT-Based neural network for inpatient fall detection from electronic medical records: retrospective cohort study. JMIR medical informatics, 2024, vol. 12, p. e48995, DOI: 10.2196/48995.
- 47. Daru D., Surani H., Koladia H., et al. Depression detection using hybrid transformer networks, 2023, pp. 593–604, DOI: 10.1007/978-981-99-1414-2 44.
- 48. Tang S., Li C., Zhang P., Tang R. SwinLSTM: improving spatiotemporal prediction accuracy using swin transformer and LSTM, 2023, DOI: 10.48550/arXiv.2308.09891.
- 49. Masci J., Meier U., Cireşan D., et al. Stacked convolutional auto-encoders for hierarchical feature extraction, 2011, pp. 52–59, DOI: 10.1007/978-3-642-21735-7\_7.
- 50. Liang H., Sun X., Sun Y., et al. Text feature extraction based on deep learning: a review. EURASIP Journal on wireless communications and networking, 2017, vol. 2017, no. 1, p. 211, DOI: 10.1186/s13638-017-0993-1.
- 51. Chen Y., Zaki M.J. KATE. Proceedings of the 23rd ACM sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining. New York, NY, USA: ACM, 2017, pp. 85–94, DOI: 10.1145/3097983.3098017.
- 52. İrsoy O., Alpaydın E. Unsupervised feature extraction with autoencoder trees. Neurocomputing, 2017, vol. 258, pp. 63–73, DOI: 10.1016/j.neucom.2017.02.075.
- 53. Mehrotra A., Musolesi M. Using autoencoders to automatically extract mobility features for predicting depressive states. Proceedings of the ACM on interactive, mobile, wearable and ubiquitous technologies, 2018, vol. 2, no. 3, pp. 1–20, DOI: 10.1145/3264937.
- 54. Soares R.G.F. Effort estimation via text classification and autoencoders. IEEE 2018 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), 2018, pp. 1–8, DOI: 10.1109/IJCNN.2018.8489030.
- 55. Gui T., Zhang Q., Zhu L., et al. Depression detection on social media with reinforcement learning, 2019, pp. 613–624, DOI: 10.1007/978-3-030-32381-3\_49.
- 56. Che L., Yang X., Wang L. Text feature extraction based on stacked variational autoencoder. Microprocessors and microsystems, 2020, vol. 76, p. 103063, DOI: 10.1016/j.micpro.2020.103063.
- 57. Montero I., Pappas N., Smith N.A. Sentence bottleneck autoencoders from transformer language models. 2021, DOI: 10.48550/arXiv.2109.00055.
- 58. Rama K., Kumar P., Bhasker B. Deep autoencoders for feature learning with embeddings for recommendations: a novel recommender system solution. Neural computing and applications, 2021, vol. 33, no. 21, pp. 14167–14177, DOI: 10.1007/s00521-021-06065-9.

- 59. Ringeval F., et al. AVEC 2019 Workshop and challenge: state-of-mind, detecting depression with AI, and Cross-cultural affect recognition. Proceedings of the 9th International on audio/visual emotion challenge and workshop, New York, NY, USA: ACM, 2019, pp. 3–12, DOI: 10.1145/3347320.3357688.
- 60. Li M., Sun X., Wang M. Detecting depression with heterogeneous graph neural network in clinical interview transcript. IEEE Transactions on computational social systems, 2023, pp. 1–10, DOI: 10.1109/TCSS.2023.3263056.
- 61. Abbas M.A., et al. Novel Transformer based contextualized embedding and probabilistic features for depression detection from social media. IEEE Access, 2024, vol. 12, pp. 54087–54100, DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3387695.
- 62. Hsu W.N., et al. HuBERT: self-supervised speech representation learning by masked prediction of hidden units. IEEE/ACM Transactions on audio, speech, and language processing, 2021, vol. 29, pp. 3451–3460, DOI: 10.1109/TASLP.2021.3122291.
- 63. Lam G., Dongyan H., Lin W. Context-aware deep learning for multi-modal depression detection. ICASSP 2019 2019 IEEE International conference on acoustics, speech and signal processing (ICASSP), 2019, pp. 3946–3950, DOI: 10.1109/ICASSP.2019.8683027.
- 64. Firoz N., Beresteneva O.G., Vladimirovich A.S., et al. Automated text-based depression detection using hybrid ConvLSTM and Bi-LSTM Model. 2023 Third International Conference on Artificial Intelligence and Smart Energy (ICAIS). IEEE, 2023, pp. 734–740, DOI: 10.1109/ICAIS56108.2023.10073683.
- 65. Verma B., Gupta S., Goel L. A Neural network based hybrid model for depression detection in Twitter. 2020, pp. 164–175, DOI: 10.1007/978-981-15-6634-9\_16.
- 66. Vandana, Marriwala N., Chaudhary D. A hybrid model for depression detection using deep learning. Measurement: Sensors, 2023, vol. 25, p. 100587, DOI: 10.1016/j.measen.2022.100587.
- 67. Chen J., et al. IIFDD: Intra and inter-modal fusion for depression detection with multi-modal information from Internet of Medical Things. Information fusion, 2024, vol. 102, p. 102017, DOI: 10.1016/j.inffus.2023.102017.
- 68. Williamson J.R., et al. Detecting depression using vocal, facial and semantic communication cues. Proceedings of the 6th International Workshop on Audio/visual emotion challenge, New York, NY, USA: ACM, 2016, pp. 11–18, DOI: 10.1145/2988257.2988263.
- 69. Al Hanai T., Ghassemi M., Glass J. Detecting depression with audio/text sequence modeling of interviews. interspeech 2018. ISCA, 2018, pp. 1716–1720, DOI: 10.21437/Interspeech.2018-2522.
- 70. Rodrigues Makiuchi M., Warnita T., et al. Multimodal fusion of BERT-CNN and gated CNN representations for depression detection. Proceedings of the 9th International on audio/visual emotion challenge and workshop. New York, NY, USA: ACM, 2019, pp. 55–63, DOI: 10.1145/3347320.3357694.
- 71. Vandana, Marriwala N., Chaudhary D. A hybrid model for depression detection using deep learning. Measurement: Sensors, 2023, vol. 25, p. 100587, DOI: 10.1016/j.measen.2022.100587.
- 72. Das A.K., Naskar R. A deep learning model for depression detection based on MFCC and CNN generated spectrogram features. Biomedical signal processing and control, 2024, vol. 90, p. 105898, DOI: 10.1016/j.bspc.2023.105898.
- 73. Bertl M., et al. Evaluation of deep learning-based depression detection using medical claims data. Artificial Intelligence in medicine, 2024, vol. 147, p. 102745, DOI: 10.1016/j.artmed.2023.102745.
- 74. Mo H., et al. A Multimodal data-driven framework for anxiety screening. IEEE Transactions on instrumentation and measurement, 2024, vol. 73, pp. 1–13, DOI: 10.1109/TIM.2024.3352713.
- 75. Iyortsuun N.K., et al. Additive cross-modal attention network (ACMA) for depression detection based on audio and textual features. IEEE Access, 2024, vol. 12, pp. 20479–20489, DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3362233.
- 76. Fan C., et al. Light-weight residual convolution-based capsule network for EEG emotion recognition. Advanced Engineering Informatics, 2024, vol. 61, p. 102522, DOI: 10.1016/j.aei.2024.102522.
- 77. Fan H., et al. Transformer-based multimodal feature enhancement networks for multimodal depression detection integrating video, audio and remote photoplethysmograph signals. Information Fusion, 2024, vol. 104, p. 102161, DOI: 10.1016/j.inffus.2023.102161.
- 78. Artstein R., et al. SimSensei Kiosk: A virtual human interviewer for healthcare decision support, 2014.
- 79. Manning C., Schutze H. Foundations of Statistical Natural Language Processing. MIT Press, 1999.
- 80. Hotho A., Nürnberger A., Paaß G. A Brief Survey of Text Mining. Journal for Language Technology and Computational Linguistics, 2005, vol. 20, no. 1, pp. 19–62, DOI: 10.21248/jlcl.20.2005.68.
- 81. Lin L., Chen X., Shen Y., Zhang L. Towards automatic depression detection: A BiLSTM/1D CNN-Based Model. Applied sciences, 2020, vol. 10, no. 23, p. 8701, DOI: 10.3390/app10238701.
- 82. Sun G., Zhao S., Zou B., An Y. Multimodal depression detection using a deep feature fusion network. Third International Conference on Computer Science and Communication Technology (ICCSCT 2022). SPIE, 2022, p. 269, DOI: 10.1117/12.2662620.

- 83. Bennetot A., Laurent J.-L., Chatila R., et al. Towards Explainable Neural-Symbolic Visual Reasoningm 2019.
- 84. Ye J., Zhang J., Shan H. DepMamba: Progressive fusion mamba for multimodal depression detection. ICASSP 2025 2025 IEEE International conference on acoustics, speech and signal processing (ICASSP), Hyderabad, India, 2025, pp. 1–5, DOI: 10.1109/ICASSP49660.2025.10889975.

**Неда Фироз.** Научный сотрудник Томского государственного университета. Научные интересы лежат в области искусственного интеллекта и машинного обучения, с особым акцентом на оптимизацию диагностики депрессии с использованием передовых методов глубокого обучения. AuthorID: 1237549, SPIN-код: 4497-4847, ORCID 0000-0003-4696-2072, nedafiroz1910@gamil.com.

**Берестнева Ольга Григорьевна.** Доктор технических наук, профессор кафедры информационных технологий Томского политехнического университета. AuthorID: 112998, SPIN: 8026-4116, ORCID 0000-0002-4243-0637, ogb6@yandex.ru, 634050, Россия, Томск-50, проспект Ленина, 30.

Аксенов Сергей Владимирович. Кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий Томского политехнического университета (ТПУ). Область научных интересов: разработка интеллектуальных систем для анализа многомерных данных, технологий распараллеливания вычислений и компьютерного зрения. AuthorID: 505275, SPIN-код: 2229-4552. axyonov@tpu.ru.

UDC 004.81

DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.005

# Multimodal depression detection using Multistream Mood Insight Encoder (MMIE)

Neda Firoz<sup>1</sup>, Olga G. Berestneva<sup>2</sup>, Sergey V. Aksenov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tomsk State University, Russia, Tomsk, *nedafiroz1910@gmail.com* <sup>2</sup>Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk

Abstract. The global surge in the prevalence of depression, characterized by persistent sadness, disinterest, and decreased functioning, highlights the shortcomings of prevailing diagnostic and treatment paradigms. This underscores the urgent need for enhanced interventions, given the inherent limitations of traditional approaches to diagnosing depression. Recent advances in artificial intelligence applications have sparked growing interest in the development of automated depression diagnostic systems among emotion computing experts. The emergence of large-scale language models, such as BERT and its derivatives, for text-based depression detection demonstrates the need for multimodal approaches that integrate text and audio data to achieve more accurate diagnosis. Here, we explore the capabilities of existing large-scale language models and present a proposed multi-stream model, the Multi-Stream Mood Insight Encoder (MMIE). MMIE is designed to seamlessly utilize integrated text and audio data streams with processing capabilities via the Reformer encoder. As part of this concept, linguistic features such as absolutist words and first-person pronouns were incorporated into the Reformer encoder. This holistic approach facilitated a comprehensive analysis of a person's mood and emotional state. Experiments demonstrated that the ClinicalBERT language model outperformed the proposed binary depression classification model. Subsequently, the sigmoid values of the Reformer model were used to diagnose depression. Using the proposed model, experiments were conducted on the DAIC-WOZ dataset. The results showed significant improvements, demonstrating an F1 of 0.9538 for classification, an MAE of 3.42, and an RMSE of 4.64 for regression compared to state-of-the-art methods. These results demonstrate the effectiveness of the proposed model in facilitating the diagnosis of depression.

Keywords: audio, clinical analysis, depression detection, LLMs, Reformer, MMIE

**Acknowledgements:** The authors express their gratitude to the DAIC\_WOZ dataset license, which significantly facilitated their research efforts. They are also grateful to the Tomsk State University Library for providing the authors with access to a wide range of valuable resources. This research was supported by a grant from the Government of the Russian Federation (Agreement No. 075-15-2025-009 dated February 28, 2025).

### References

- 1. Institute of Health Metrics and Evaluation. Global health data exchange (GHDx), 2021.
- 2. Twenge J.M., Cooper A.B., Joiner T.E., et al. Age, period, and cohort trends in mood disorder indicators and suicide-related outcomes in a nationally representative dataset, 2005–2017. Journal of abnormal psychology, 2019, vol. 128, no. 3, pp. 185–199, DOI: 10.1037/abn0000410.
- 3. Diagnostic and statistical manual of mental disorders. 5th ed. American psychiatric association, 2013.
- 4. Nestler E.J., Barrot M., DiLeone R.J., et al. Neurobiology of Depression. Neuron, 2002, vol. 34, no. 1, pp. 13–25, DOI: 10.1016/S0896-6273(02)00653-0.
- 5. Cohen K. Absolutist thinking and depression, 2019.
- 6. Blazer D.G. Psychiatry and the oldest old. American journal of psychiatry, 2000, vol. 157, no. 12, pp. 1915–1924, DOI: 10.1176/appi.ajp.157.12.1915.
- 7. Zarate C.A., et al. A Randomized Trial of an N-methyl-D-aspartate Antagonist in treatment-resistant major depression. Archives of general psychiatry, 2006, vol. 63, no. 8, p. 856, DOI: 10.1001/archpsyc.63.8.856.
- 8. Chattopadhyay S. A neuro-fuzzy approach for the diagnosis of depression. Applied Computing and Informatics, 2017, vol. 13, no. 1, pp. 10–18, DOI: 10.1016/j.aci.2014.01.001.
- 9. Joshi M.L., Kanoongo N. Depression detection using emotional artificial intelligence and machine learning: A closer review. Materials Today: Proceedings, 2022, vol. 58, pp. 217–226, DOI: 10.1016/j.matpr.2022.01.467.
- 10. Miao X., Li Y., Wen M., Liu Y., et al. Fusing features of speech for depression classification based on higher-order spectral analysis. Speech Communication, 2022, vol. 143, pp. 46–56, DOI: 10.1016/j.specom.2022.07.006.
- 11. Ilias L., Mouzakitis S., Askounis D. Calibration of transformer-based models for identifying stress and depression in social media. IEEE Transactions on computational social systems, 2023, pp. 1–12, DOI: 10.1109/TCSS.2023.3283009.
- 12. Oureshi S.A., Dias G., Saha S., Hasanuzzaman M. Gender-aware estimation of depression severity level in a multimodal setting. 2021 International joint conference on neural networks (IJCNN), IEEE, 2021, pp. 1–8, DOI: 10.1109/IJCNN52387.2021.9534330.
- 13. Firoz N., Beresteneva O.G., Vladimirovich A.S., et al. Automated text-based depression detection using hybrid ConvLSTM and Bi-LSTM model. 2023 Third International conference on artificial intelligence and smart energy (ICAIS). IEEE, 2023, pp. 734–740, DOI: 10.1109/ICAIS56108.2023.10073683.
- 14. Ahmad Wani M., ELaffendi M.A., Shakil K.A., et al. Depression screening in humans with AI and deep learning techniques. IEEE Transactions on computational social systems, 2023, vol. 10, no. 4, pp. 2074–2089, DOI: 10.1109/TCSS.2022.3200213.
- 15. Mazumdar H., Chakraborty C., Sathvik M., et al. GPTFX: A Novel GPT-3 based framework for mental health detection and explanations. IEEE Journal of biomedical and health informatics, 2023, pp. 1–8, DOI: 10.1109/JBHI.2023.3328350.
- 16. Meng Q., Catchpoole D., Skillicom D., et al. Relational autoencoder for feature extraction. 2017 International Joint conference on neural networks (IJCNN), IEEE, 2017, pp. 364–371, DOI: 10.1109/IJCNN.2017.7965877.
- 17. Devlin J., Chang M.-W., Lee K., Toutanova K. BERT: pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding, 2018, DOI: 10.48550/arXiv.1810.04805.
- 18. Ji S., Zhang T., Ansari L., Fu J., et al. MentalBERT: publicly available pretrained language models for mental healthcare. Proceedings of the language resources and evaluation conference (LREC), 2022, DOI: 10.48550/arXiv.2110.15621.
- 19. Vajre V., Naylor M., Kamath U., et al. PsychBERT: a mental health language model for social media mental health behavioral analysis. 2021 IEEE International conference on bioinformatics and biomedicine (BIBM), 2021, pp. 1077–1082, DOI: 10.1109/BIBM52615.2021.9669469.
- 20. Huang K., Altosaar J., Ranganath R. ClinicalBERT: modeling clinical notes and predicting hospital readmission, 2019.
- 21. Saha T., Ramesh Jayashree S., Saha S., et al. BERT-caps: a transformer-based capsule network for tweet act classification. IEEE Transactions on computational social systems, 2020, vol. 7, no. 5, pp. 1168–1179, DOI: 10.1109/TCSS.2020.3014128.
- 22. Saha T., Reddy S.M., Saha S., et al. Mental health disorder identification from motivational conversations. IEEE Transactions on computational social systems, 2023, vol. 10, no. 3, pp. 1130–1139, DOI: 10.1109/TCSS.2022.3143763.
- 23. Li M., et al. TrOCR: Transformer-based optical character recognition with pre-trained models. Proceedings of the AAAI conference on Artificial Intelligence, 2023, vol. 37, no. 11, pp. 13094–13102, DOI: 10.1609/aaai.v37i11.26538.
- 24. Anindyaputri N.A., Girsang A.S. A Comparative study of deep learning models for detecting depressive disorder in tweets. Journal of system and management sciences, 2024, vol. 14, no. 3, DOI: 10.33168/JSMS.2024.0318.

- 25. Flint A.J., Black S.E., Campbell-Taylor I., et al. Abnormal speech articulation, psychomotor retardation, and subcortical dysfunction in major depression. Journal of psychiatric research, 1993, vol. 27, no. 3, pp. 309–319, DOI: 10.1016/0022-3956(93)90041-Y.
- 26. Korszun A. Facial pain, depression and stress connections and directions. Journal of oral pathology & medicine, 2002, vol. 31, no. 10, pp. 615–619, DOI: 10.1034/j.1600-0714.2002.00091.x.
- 27. He L., Cao C. Automated depression analysis using convolutional neural networks from speech. Journal of biomedical informatics, 2018, vol. 83, pp. 103–111, DOI: 10.1016/j.jbi.2018.05.007.
- 28. Dong Y., Yang X. A hierarchical depression detection model based on vocal and emotional cues. Neurocomputing, 2021, vol. 441, pp. 279–290, DOI: 10.1016/j.neucom.2021.02.019.
- 29. Zheng W., Yan L., Wang F.-Y. Two birds with one stone: knowledge-embedded temporal convolutional transformer for depression detection and emotion recognition. IEEE Transactions on affective computing, 2023, vol. 14, no. 4, pp. 2595–2613, DOI: 10.1109/TAFFC.2023.3282704.
- 30. Degottex G., Kane J., Drugman T., et al. COVAREP A collaborative voice analysis repository for speech technologies. 2014 IEEE International conference on acoustics, speech and signal processing (ICASSP), 2014, pp. 960–964, DOI: 10.1109/ICASSP.2014.6853739.
- 31. Kim J.C., Clements M.A. Formant-based feature extraction for emotion classification from speech. IEEE 2015 38th International conference on telecommunications and signal processing (TSP), 2015, pp. 477–481, DOI: 10.1109/TSP.2015.7296308.
- 32. Ringeval F., et al. AVEC'19. Proceedings of the 27th ACM international conference on multimedia. New York, NY, USA: ACM, 2019, pp. 2718–2719, DOI: 10.1145/3343031.3350550.
- 33. Tølbøll K.B. Linguistic features in depression: a meta-analysis. Journal of Language Works Sprogvidenskabeligt Studentertidsskrift, 2019, vol. 4, no. 2, pp. 39–59, available at: https://tidsskrift.dk/lwo/article/view/117798
- 34. Al-Mosaiwi M., Johnstone T. In an absolute state: elevated use of absolutist words is a marker specific to anxiety, depression, and suicidal ideation. Clinical psychological science, 2018, vol. 6, no. 4, pp. 529–542, DOI: 10.1177/2167702617747074.
- 35. Bird S., Klein E., Loper E. Natural language processing with Python: analyzing text with the natural language toolkit. O'Reilly Media, Inc., 2009.
- 36. Malhotra A., Jindal R. XAI transformer-based approach for interpreting depressed and suicidal user behavior on online social networks. Cognitive systems research, 2023, p. 101186, DOI: 10.1016/j.cogsys.2023.101186.
- 37. Mitra V., et al. The SRI AVEC-2014 Evaluation System. Proceedings of the 4th international workshop on audio/visual emotion challenge, New York, NY, USA: ACM, 2014, pp. 93–101, DOI: 10.1145/2661806.2661818.
- 38. Shi X., et al. Convolutional LSTM network: a machine learning approach for precipitation nowcasting. 2015.
- 39. Amanat A., et al. Deep learning for depression detection from textual data. Electronics, 2022, vol. 11, no. 5, p. 676, DOI: 10.3390/electronics11050676.
- 40. Akter M.S., Shahriar H., Cuzzocrea A. A Trustable LSTM-autoencoder network for cyberbullying detection on social media using synthetic data, 2023, DOI: 10.48550/arXiv.2308.09722.
- 41. Lu J., et al. Prediction of depression severity based on transformer encoder and CNN Model. IEEE, 2022 13th International symposium on Chinese spoken language processing (ISCSLP), 2022, pp. 339–343, DOI: 10.1109/ISCSLP57327.2022.10038064.
- 42. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., et al. Attention is all you need, 2017, DOI:10.48550/arXiv.1706.03762.
- 43. Kitaev N., Kaiser Ł., Levskaya A. Reformer: the efficient transformer, 2020, DOI: 10.48550/arXiv.2001.04451.
- 44. Mallol-Ragolta A., Zhao Z., Stappen L., et al. A Hierarchical attention network-based approach for depression detection from transcribed clinical interviews. Interspeech 2019, ISCA, 2019, pp. 221–225, DOI: 10.21437/Interspeech.2019-2036.
- 45. Zhang Y., He Y., Rong L., Ding Y. A hybrid model for depression detection with transformer and bi-directional long short-term memory. 2022 IEEE International conference on bioinformatics and biomedicine (BIBM), 2022, pp. 2727–2734, DOI: 10.1109/BIBM55620.2022.9995184.
- 46. Cheligeer C., et al. BERT-Based neural network for inpatient fall detection from electronic medical records: retrospective cohort study. JMIR medical informatics, 2024, vol. 12, p. e48995, DOI: 10.2196/48995.
- 47. Daru D., Surani H., Koladia H., et al. Depression detection using hybrid transformer networks, 2023, pp. 593–604, DOI: 10.1007/978-981-99-1414-2 44.
- 48. Tang S., Li C., Zhang P., Tang R. SwinLSTM: improving spatiotemporal prediction accuracy using swin transformer and LSTM, 2023, DOI: 10.48550/arXiv.2308.09891.
- 49. Masci J., Meier U., Cireşan D., et al. Stacked convolutional auto-encoders for hierarchical feature extraction, 2011, pp. 52–59, DOI: 10.1007/978-3-642-21735-7\_7.
- 50. Liang H., Sun X., Sun Y., et al. Text feature extraction based on deep learning: a review. EURASIP Journal on wireless communications and networking, 2017, vol. 2017, no. 1, p. 211, DOI: 10.1186/s13638-017-0993-1.

- 51. Chen Y., Zaki M.J. KATE. Proceedings of the 23rd ACM sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining. New York, NY, USA: ACM, 2017, pp. 85–94, DOI: 10.1145/3097983.3098017.
- 52. İrsoy O., Alpaydın E. Unsupervised feature extraction with autoencoder trees. Neurocomputing, 2017, vol. 258, pp. 63–73, DOI: 10.1016/j.neucom.2017.02.075.
- 53. Mehrotra A., Musolesi M. Using autoencoders to automatically extract mobility features for predicting depressive states. Proceedings of the ACM on interactive, mobile, wearable and ubiquitous technologies, 2018, vol. 2, no. 3, pp. 1–20, DOI: 10.1145/3264937.
- 54. Soares R.G.F. Effort estimation via text classification and autoencoders. IEEE 2018 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), 2018, pp. 1–8, DOI: 10.1109/IJCNN.2018.8489030.
- 55. Gui T., Zhang Q., Zhu L., et al. Depression detection on social media with reinforcement learning, 2019, pp. 613–624, DOI: 10.1007/978-3-030-32381-3\_49.
- 56. Che L., Yang X., Wang L. Text feature extraction based on stacked variational autoencoder. Microprocessors and microsystems, 2020, vol. 76, p. 103063, DOI: 10.1016/j.micpro.2020.103063.
- 57. Montero I., Pappas N., Smith N.A. Sentence bottleneck autoencoders from transformer language models. 2021, DOI: 10.48550/arXiv.2109.00055.
- 58. Rama K., Kumar P., Bhasker B. Deep autoencoders for feature learning with embeddings for recommendations: a novel recommender system solution. Neural computing and applications, 2021, vol. 33, no. 21, pp. 14167–14177, DOI: 10.1007/s00521-021-06065-9.
- 59. Ringeval F., et al. AVEC 2019 Workshop and challenge: state-of-mind, detecting depression with AI, and Cross-cultural affect recognition. Proceedings of the 9th International on audio/visual emotion challenge and workshop, New York, NY, USA: ACM, 2019, pp. 3–12, DOI: 10.1145/3347320.3357688.
- 60. Li M., Sun X., Wang M. Detecting depression with heterogeneous graph neural network in clinical interview transcript. IEEE Transactions on computational social systems, 2023, pp. 1–10, DOI: 10.1109/TCSS.2023.3263056.
- 61. Abbas M.A., et al. Novel Transformer based contextualized embedding and probabilistic features for depression detection from social media. IEEE Access, 2024, vol. 12, pp. 54087–54100, DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3387695.
- 62. Hsu W.N., et al. HuBERT: self-supervised speech representation learning by masked prediction of hidden units. IEEE/ACM Transactions on audio, speech, and language processing, 2021, vol. 29, pp. 3451–3460, DOI: 10.1109/TASLP.2021.3122291.
- 63. Lam G., Dongyan H., Lin W. Context-aware deep learning for multi-modal depression detection. ICASSP 2019 2019 IEEE International conference on acoustics, speech and signal processing (ICASSP), 2019, pp. 3946–3950, DOI: 10.1109/ICASSP.2019.8683027.
- 64. Firoz N., Beresteneva O.G., Vladimirovich A.S., et al. Automated text-based depression detection using hybrid ConvLSTM and Bi-LSTM Model. 2023 Third International Conference on Artificial Intelligence and Smart Energy (ICAIS). IEEE, 2023, pp. 734–740, DOI: 10.1109/ICAIS56108.2023.10073683.
- 65. Verma B., Gupta S., Goel L. A Neural network based hybrid model for depression detection in Twitter. 2020, pp. 164–175, DOI: 10.1007/978-981-15-6634-9\_16.
- 66. Vandana, Marriwala N., Chaudhary D. A hybrid model for depression detection using deep learning. Measurement: Sensors, 2023, vol. 25, p. 100587, DOI: 10.1016/j.measen.2022.100587.
- 67. Chen J., et al. IIFDD: Intra and inter-modal fusion for depression detection with multi-modal information from Internet of Medical Things. Information fusion, 2024, vol. 102, p. 102017, DOI: 10.1016/j.inffus.2023.102017.
- 68. Williamson J.R., et al. Detecting depression using vocal, facial and semantic communication cues. Proceedings of the 6th International Workshop on Audio/visual emotion challenge, New York, NY, USA: ACM, 2016, pp. 11–18, DOI: 10.1145/2988257.2988263.
- 69. Al Hanai T., Ghassemi M., Glass J. Detecting depression with audio/text sequence modeling of interviews. interspeech 2018. ISCA, 2018, pp. 1716–1720, DOI: 10.21437/Interspeech.2018-2522.
- 70. Rodrigues Makiuchi M., Warnita T., et al. Multimodal fusion of BERT-CNN and gated CNN representations for depression detection. Proceedings of the 9th International on audio/visual emotion challenge and workshop. New York, NY, USA: ACM, 2019, pp. 55–63, DOI: 10.1145/3347320.3357694.
- 71. Vandana, Marriwala N., Chaudhary D. A hybrid model for depression detection using deep learning. Measurement: Sensors, 2023, vol. 25, p. 100587, DOI: 10.1016/j.measen.2022.100587.
- 72. Das A.K., Naskar R. A deep learning model for depression detection based on MFCC and CNN generated spectrogram features. Biomedical signal processing and control, 2024, vol. 90, p. 105898, DOI: 10.1016/j.bspc.2023.105898.
- 73. Bertl M., et al. Evaluation of deep learning-based depression detection using medical claims data. Artificial Intelligence in medicine, 2024, vol. 147, p. 102745, DOI: 10.1016/j.artmed.2023.102745.

- 74. Mo H., et al. A Multimodal data-driven framework for anxiety screening. IEEE Transactions on instrumentation and measurement, 2024, vol. 73, pp. 1–13, DOI: 10.1109/TIM.2024.3352713.
- 75. Iyortsuun N.K., et al. Additive cross-modal attention network (ACMA) for depression detection based on audio and textual features. IEEE Access, 2024, vol. 12, pp. 20479–20489, DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3362233.
- 76. Fan C., et al. Light-weight residual convolution-based capsule network for EEG emotion recognition. Advanced Engineering Informatics, 2024, vol. 61, p. 102522, DOI: 10.1016/j.aei.2024.102522.
- 77. Fan H., et al. Transformer-based multimodal feature enhancement networks for multimodal depression detection integrating video, audio and remote photoplethysmograph signals. Information Fusion, 2024, vol. 104, p. 102161, DOI: 10.1016/j.inffus.2023.102161.
- 78. Artstein R., et al. SimSensei Kiosk: A virtual human interviewer for healthcare decision support, 2014.
- 79. Manning C., Schutze H. Foundations of Statistical Natural Language Processing. MIT Press, 1999.
- 80. Hotho A., Nürnberger A., Paaß G. A Brief Survey of Text Mining. Journal for Language Technology and Computational Linguistics, 2005, vol. 20, no. 1, pp. 19–62, DOI: 10.21248/jlcl.20.2005.68.
- 81. Lin L., Chen X., Shen Y., Zhang L. Towards automatic depression detection: A BiLSTM/1D CNN-Based Model. Applied sciences, 2020, vol. 10, no. 23, p. 8701, DOI: 10.3390/app10238701.
- 82. Sun G., Zhao S., Zou B., An Y. Multimodal depression detection using a deep feature fusion network. Third International Conference on Computer Science and Communication Technology (ICCSCT 2022). SPIE, 2022, p. 269, DOI: 10.1117/12.2662620.
- 83. Bennetot A., Laurent J.-L., Chatila R., et al. Towards Explainable Neural-Symbolic Visual Reasoningm 2019.
- 84. Ye J., Zhang J., Shan H. DepMamba: Progressive fusion mamba for multimodal depression detection. ICASSP 2025 2025 IEEE International conference on acoustics, speech and signal processing (ICASSP), Hyderabad, India, 2025, pp. 1–5, DOI: 10.1109/ICASSP49660.2025.10889975.

Firoz Neda. Research fellow, Tomsk State University. Her research interests lie in artificial intelligence and machine learning, with a particular focus on optimizing depression diagnostics using advanced deep learning methods. AuthorID: 112998, SPIN: 8026-4116, ORCID 0000-0003-4696-2072, nedafiroz1910@gamil.com.

Berestneva Olga Grigoryevna. Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of Information Technology, Tomsk Polytechnic University. AuthorID: 112998, SPIN: 8026-4116, ORCID 0000-0002-4243-0637, ogb6@yandex.ru, 634050, Russia, Tomsk-50, 30 Lenin Avenue.

Aksenov Sergey Vladimirovich. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor in the Information Technology Department at Tomsk Polytechnic University (TPU). His research interests include developing intelligent systems for multidimensional data analysis, parallel computing technologies, and computer vision. AuthorID: 505275, SPIN-κο∂: 2229-4552. axyonov@tpu.ru.

Статья поступила в редакцию 01.07.2025; одобрена после рецензирования 01.10.2025; принята к публикации 09.11.2025.

The article was submitted 07/01/2025; approved after reviewing 10/01/2025; accepted for publication 11/09/2025.

## Математическое моделирование и его применение в научных исследованиях

УДК 004.94

DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.006

### Комбинаторная модель изделия на основе разрезаний гиперграфа Божко Аркадий Николаевич, Грошев Сергей Владимирович, Кузьмина Инна Анатольевна, Родионов Сергей Владимирович

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет),

Россия, Москва, s.groshev@bmstu.ru

**Аннотация.** В работе предлагается новая математическая модель изделия комбинаторного типа. Она формируется на основе всевозможных правильных разрезаний гиперграфа механической структуры на два связных подграфа и представляется в виде И-ИЛИ-дерева. Это дерево описывает все связные и координированные фрагменты изделия и отношение включения таких фрагментов. Модель можно использовать для синтеза различных проектных решений технической подготовки дискретного производства: планов сборки и разборки, разбиений на сборочные единицы и пр. И-ИЛИ-дерево разрезаний дает объективную информацию для глубокого структурного анализа сложных технических систем.

**Ключевые слова:** сборка, автоматизированное проектирование процесса сборки, планирование перемещений, пространство состояний, гиперграфовая модель

**Цитирование:** Божко А.Н. Комбинаторная модель изделия на основе разрезаний гиперграфа / А.Н. Божко, С.В. Грошев, И.А. Кузьмина, С.В. Родионов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. — № 4(40). — С. 78-89. — DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.006.

Введение. Сборка – это важнейший передел дискретного производства. Сложность промышленных изделий постоянно возрастает. Некоторые современные технические системы состоят из десятков тысяч (и более) деталей и комплектующих. Поэтому автоматизация проектирования процессов сборки (Computer aided assembly planning, CAAP), безусловно, является важной научно-технической проблемой. Первые исследования и разработки в области СААР начались в 80-е годы прошлого столетия. Корпус работ данной тематики активно пополняется в наше время. Так, в обзорной статье [1] цитируются более публикаций, посвященных различным актуальных современных аспектам автоматизации проектирования процессов сборки/разборки. Классификация основных подходов, используемых в СААР-системах, показана на рис. 1 [2].

**Методы искусственного интеллекта.** Методы ИИ применяются в СААР-системах для моделирования принятия рациональных решений при проектировании последовательности сборки изделия и разработке сборочных операций [3,4,5,6]. По бинарным отношениям предпочтения/безразличия, которые определяются на множестве деталей геометрией изделия и структурой изделия, формируются прикладные базы знаний. Для их формализации используются различные варианты семантических сетей или фреймов. Генерация проектных решений выполняется при помощи специализированных алгоритмов извлечения релевантной информации из баз [7-10].

Методы геометрического вывода. Геометрия изделия — важнейшая часть любой конструкции. Она может накладывать жесткие ограничения на проектные решения сборочного передела. В методах, основанных на геометрическом выводе (геометрической разрешимости), проектирование последовательности сборки изделия ставится и решается, как геометрическая задача. Она заключается в поиске свободной от столкновений траектории движения монтируемой детали или сборочной единицы в среде со статическими препятствиями [11-13]. Для уменьшения вычислительной сложности детали со сложной

геометрией представляются простыми геометрическими формами: параллелепипедами, многогранниками, выпуклыми оболочками, заметаниями [12]. В [13, 14] описан метод геометрической разрешимости, основанный не на глобальном геометрическом анализе сцены, а на исследовании некоторой окрестности монтируемой детали.



**Рис. 1.** Классификация моделей и методов автоматизированного проектирования сборочных процессов

**Методы планирования перемещений.** В методах этой группы моделирование сборочных процессов и операций выполняется в многомерном конфигурационном пространстве собираемого изделия. В нем монтируемая деталь или сборочная единица представляется точкой. Требуется найти траекторию перемещения детали или СЕ в служебное положение в среде с препятствиями. В терминах конфигурационного пространства можно выразить не только геометрические ограничения на перемещения монтируемых деталей, но и устойчивость, размерные и кинематические связи деталей в составе изделия [15-19].

Методы оптимизации. Во множестве актуальных публикаций [20-22] обсуждается применение методов дискретной оптимизации для выбора рациональных проектных решений в СААР-системах. Чаще всего для этого используют современные подходы к решению оптимизационных задач, основанные на бионических аналогиях, например: генетические алгоритмы, алгоритм колонии муравьев, алгоритм роя пчел и др. Во всех работах этого типа предполагается, что исходное множество альтернатив (последовательностей сборки или вариантов декомпозиции на сборочные единицы) задано априори. В работах этого направления не обсуждается основная проблема автоматизации проектирования сборочных процессов — формализация закономерностей принятия рациональных решений в СААР-системах.

Интерактивные методы. Методы этой группы – исторически первые систематические методы автоматизированного проектирования последовательности сборки изделия. Так, в [23] предложена процедура упорядочения механических связей технической системы. В ней эксперту предлагаются вопросы о возможной последовательности реализации механических связей изделия (соединений и сопряжений). Компьютер обрабатывает ответы лица, принимающего решение, и строит допустимый план сборки. В [24-26] обсуждаются различные варианты этого подхода. Целью этих исследований является уменьшение трудоемкости экспертного опроса и повышение его надежности. В современных исследованиях по СААР интерактивный подход реализуется не при помощи прямой экспертизы, а посредством прототипирования процессов сборки в системах виртуальной

реальности [27-31]. Теперь эксперт выступает в роли оператора системы оператора такой системы, выполняя компьютерный эксперимент по сборке сложного изделия.

**Комбинаторные методы.** В многочисленных методах этой группы изделие рассматривается, как множество деталей, на котором определены различные бинарные и многоместные отношения. Эти отношения индуцируются геометрическими, структурными размерными, кинематическими и другими ограничениями на возможные последовательности сборки и варианты декомпозиции изделия на сборочные единицы. Для описания отношений чаще всего используют графы, сети Петри и матрицы [32-35].

**Графовая модель механической структуры изделия.** Один из самых известных методов комбинаторного класса предложен в [35]. В нем механическая структура изделия представляется в виде так называемого графа механических связей (Liaison diagram). Приведем точное определение этой простой, но содержательной структурной модели. В графе механических связей G = (X,S) множество вершин X описывает детали изделия, а множество ребер S — механические связи (соединения и сопряжения) между парами деталей. В качестве примера рассмотрим конструкцию приводного вала (рис. 2). На Рис. 3. Граф связей приводного вала представлен граф механических связей этого изделия.

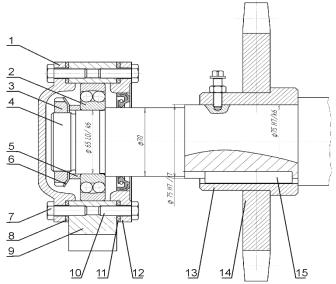


Рис. 2. Конструкция приводного вала

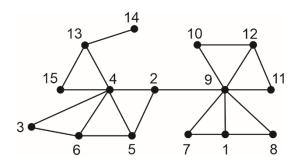


Рис. 3. Граф связей приводного вала

В терминах графа связей можно описать важнейшие свойства проектных решений сборочного передела: когерентность сборочных операций и планов [1] и связность сборочных единиц и узлов [34]. По этим причинам данная модель служит основой для нескольких систематических методик автоматизированного проектирования. Так, в [34] описан метод автоматизированного разбиения сложного изделия на сборочные единицы, которые собираются независимо. В его основе лежит разрезание графа связей на кластеры – связные

подграфы, у которых есть хотя бы одна базовая деталь и их внутренняя связность значительно превосходит внешнюю.

В [35] предложен метод иерархического многоуровневого разрезания графа на две связные компоненты (bi-partitioning). Результаты этой процедуры фиксируются в виде И-ИЛИ-дерева, в котором связки представляют разрезания, а внутренние вершины — связные подграфы, полученные делением родительского подграфа на две части. И-ИЛИ-дерево включает в себя образы всех фрагментов изделия, которые можно получить при помощи когерентных сборочных операций, поэтому его можно использовать для генерации различных проектных решений сборочного передела в дискретном производстве.

Однако граф механических связей и его производные модели имеют существенный недостаток. Любое состояние изделия в процессе сборки должно связным координированным и устойчивым. Граф механических связей позволяет учесть только первое из этих свойств. Геометрическая координация и устойчивость деталей изделии достигается при помощи базирования по внутренним конструкторским базам. Это чаще всего участки поверхностей, с которыми монтируемая деталь находится в контакте. Число таких баз может колебаться от единицы до шести (по числу степеней свободы абсолютно твердого тела в пространстве). Поэтому базирование является многоместным отношением и, в общем случае, не может быть корректно представлено при помощи бинарных математических структур, например, графов. В [36, 37] разработана гиперграфовая модель механической структуры сложной технической системы. Эта модель описывает базирование как многоместное отношение на множестве деталей изделия.

**Гиперграфовая модель механической структуры изделия.** Пусть, по-прежнему, множество деталей технической системы – (TC). Механическую структуру TC зададим в виде гиперграфа H = (X, R), у которого множество вершин X соответствует деталям TC, а множество гиперребер R — минимальные геометрически определенные подмножества деталей, координация которых достигается базированием по внутренним конструкторским базам.

На Рис. 4. Гиперграф приводного вала показан гиперграф  $H_s = (X_s, R_s)$ , описывающий механическую структуру приводного вала, изображенного на рис. 2.

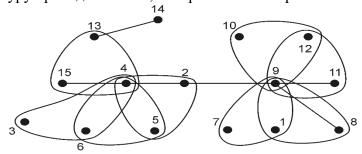


Рис. 4. Гиперграф приводного вала

Предложенная гиперграфовая модель оказалась весьма содержательной. Ее можно использовать как для глубокого структурного анализа новых проектов, так и для генерации различных проектных решений сборочного передела.

Введем точные определения.

**Определение 1.** Сборочная операция называется когерентной, если она реализует механические связи между деталями.

**Определение 2.** Сборочная операция называется секвенциальной (бинарной), если ее можно выполнить при помощи двух рабочих органов.

В подавляющем большинстве случаев сборка изделий в дискретном производстве выполняется посредством когерентных и секвенциальных сборочных операций [1].

**Определение 3.** Нормальным стягиванием будем называть операцию, в результате которой отождествляются две вершины гиперграфа H = (X, R), связанные ребром второй степени, и удаление этого ребра.

Нормальное стягивание — это математическое описание когерентной секвенциальной сборочной операции. Пусть гиперграф H=(X,R) представляет механическую структуру некоторого изделия. Последовательность нормальных стягиваний, которая трансформирует H=(X,R) в точку, является математическим описанием когерентного и секвенциального сборочного плана [36].

**Определение 4.** Гиперграф, для которого существует последовательность нормальных стягиваний ребер, преобразующая его в точку, будем называть s-гиперграфом.

Итак, корректной математической моделью механической структуры технической системы служит *s*-гиперграф. Его стягиваемость — это точное математическое описание собираемости изделия. *S*-подграфы *s*-гиперграфа представляют собой формальные образы фрагментов изделия, которые можно собрать независимо: конструкторских или технологических сборочных единиц, узлов и пр.

Рассмотрим стягивание гиперграфа, изображенного на рис. 4. Вектор (4, 15, 13, 14, 2, 9, 5, 6, 3, 11, 12, 10, 8, 1, 7) представляет собой описание когерентного секвенциального плана сборки приводного вала. Этот план описывается в виде последовательности нормальных стягиваний, в которой каждая вершина присоединяется к стянутому фрагменту гиперграфа при помощи стягивания некоторого ребра второй степени. На Рис. 5. Гиперграф, описывающий состояние вала после установки деталей 2, 4, 13, 14, 15 показано состояние гиперграфа  $H_s = (X_s, R_s)$  перед стягиванием вершины с номером 9.

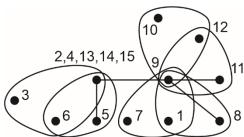


Рис. 5. Гиперграф, описывающий состояние вала после установки деталей 2, 4, 13, 14, 15

В [37] доказана простая и важная теорема о необходимых условиях стягиваемости гиперграфов.

**Теорема 1.** Если гиперграф H = (X, R) стягивается, то:

- 1) во множестве R существует по крайне мере одно ребро второй степени;
- 2) гиперграф H является связным;
- 3) выполняется равенство |X| = |R| + 1.

Приведем содержательные аргументы, обосновывающие справедливость данной теоремы. Очевидно, что преобразование *s*-гиперграфа в точку начинается со стягивания некоторого ребра второй степени, что доказывает его наличие в гиперграфе (условие 1). Успешное завершение процедуры стягиваний свидетельствует о связности гиперграфа (условие 2).

Рассмотрим необходимость третьего условия. Ребра гиперграфа H=(X,R) представляют минимальные геометрические подмножества деталей, полученные базированием по внутренним конструкторским базам. Путь выбрана некоторая последовательность сборки изделия. Первая в этой последовательности деталь монтируется

по внешним базам, которые доставляет ей сборочное приспособление или монтажный стол. Этой детали не требуются внутренние конструкторские базы. Для каждой последующей в этом упорядочении детали нужен только один комплект баз, который обеспечивает ей собранный фрагмент изделия, что доказывает справедливость условия 3.

Разрезания гиперграфа. На ранних этапах проектирования в современных САD и СААР-системах детали изделия считаются невесомыми и абсолютно твердыми телами. С учетом этих упрощающих предположений сборка и разборка изделия являются взаимообратимыми процессами. Это дает возможность моделировать сборочные операции, как операции демонтажа. Очевидно, что математическим описанием операции разборки служит разрезание гиперграфа, описывающего механическую структуру изделия, на два или более подграфа, которые не связаны между собой.

Введем точные определения. Пусть задан гиперграф H = (X, R), а  $A \subseteq X$  — подмножество его вершин.

**Определение** 5. Подграф  $[A] = (A, R_A)$  гиперграфа H = (X, R) называется порожденным множеством вершин A, если он содержит те и только те ребра, которые инцидентны вершинам из множества A в H.

Если задан гиперграф H = (X, R), то для полного определения порожденного подграфа достаточно указать множество его вершин A.

Пусть H = (X, R) стягивается в точку, то есть является *s*-гиперграфом.

**Определение 6.** Вектор (A,B),  $A,B\subseteq X$ , называется разрезанием гиперграфа H=(X,R), если пара (A,B) представляет собой разбиение множества вершин X, а подграфы [A] и [B], порожденные в H множествами вершин A и B, являются стягиваемыми.

**Теорема 2.** Для того, чтобы разбиение  $A \bigcup B = X, A \cap B = \emptyset$  множества вершин X представляло собой разрезание в смысле определения 6, требуется удалить только одно ребро s-гиперграфа H = (X, R).

Доказательство. Пусть (A,B) — разрезание. Рассмотрим два подграфа  $[A]=(A,R_A)$  и  $[B]=(B,R_B)$ , которые порождены в гиперграфе H множествами вершин A и B. Из определения разрезания следует, что эти подграфы являются стягиваемыми, а значит, для них выполняются равенства  $|A|=|R_A|+1$  и  $|B|=|R_b|+1$ . Если сложить эти равенства, то получим  $|A|+|B|=|R_A|+|R_b|+2$ . Поскольку (A,B) — разбиение множества вершин, то |A|+|B|=|X|. Отсюда следует, что  $|X|=|R_A|+|R_b|+2$ . С другой стороны, для H=(X,R) выполняется равенство |X|=|R|+1, поэтому  $|R|=|R_A|+|R_b|+1$ . Теорема доказана.

**И-ИЛИ-дерево разрезаний гиперграфа.** Доказанная простая теорема дает конструктивный способ получения различных разрезаний s-гиперграфа на s-подграфы, а именно, удаление любого ребра гиперграфа H, которое является мостом, дает разрезание в смысле определения 6.

Разрезание s-гиперграфа порождает два s-подграфа, к которым, в свою очередь можно применить операцию разрезания. Реализуем все возможные применения этой операции, вплоть до элементарных подграфов, которыми являются отдельные вершины. Результаты этой рекурсивной процедуры удобно представить в виде И-ИЛИ-дерева. Корень дерева — исходный s-гиперграф H=(X,R), внутренние вершины представляют собой s-подграфы, полученные

при помощи разрезаний, листья дерева — это вершины гиперграфа H, а связки описывают сами разрезания.

На рис. 6 показан фрагмент И-ИЛИ-дерева разрезаний гиперграфа  $H_s = (X_s, R_s)$ , представленного на рис. 4. Это большая комбинаторная модель, полное изображение которой просто невозможно на листе формата A4.

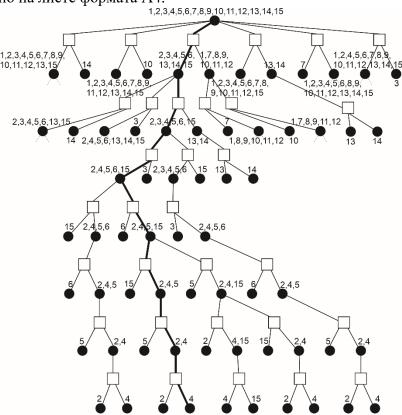


Рис. 6. И-ИЛИ-дерево разрезаний гиперграфа

Квадратные вершины белого цвета обозначают связки второй степени И-ИЛИ-дерева. Обозначим T(H) И-ИЛИ-дерево разрезаний гиперграфа H=(X,R). Дерево T(H)

включает в себя всевозможные s-подграфы, которые можно получить из s-гиперграфа при помощи разрезаний. Эти подграфы служат образами различных конструктивных частей изделия, которые обладают связностью и геометрической координацией, необходимой для независимой сборки. Это конструкторские и технологические сборочные единицы, узлы, опытные сборочные единицы, состояния изделия в процессе сборки или разборки и др. Дерево T(H) — это очень информативный носитель, который можно использовать для синтеза разнообразных проектных решений при сборке, разборке, ремонте, испытаниях, регулировке, пригонке и других операциях с изделием. Перечислим некоторые из них.

Разрезание представляет собой математическое описание операции разборки. В силу взаимной обратимости операций и планов сборки/разборки на ранних этапах проектирования обратная операция, которая заключается в соединении двух листов разрезания, служит описанием когерентной и секвенциальной операции сборки. Цепь с началом в листе и окончанием в корне дерева T(H) представляет последовательность сборки. Максимальные цепи соответствуют линейным последовательностям, немаксимальные цепи — нелинейным.

На Рис. 6. И-ИЛИ-дерево разрезаний гиперграфа показана эмфазой немаксимальная цепь, представляющая нелинейную последовательности сборки {4, 2, 5, 15, 6, 3, 13, 14},{1, 7, 8, 9, 10, 11, 12}). В этой последовательности детали, номера которых заключены в фигурные скобки, поступают на общую сборку в собранном виде.

Нисходящие цепи дерева T(H) служат моделями различных планов разборки: полной, неполной, линейной, нелинейной и др. Если максимальная цепь начинается в корне дерева, а завершается в листе, то это план полной линейной разборки. Нисходящая цепь, которая начинается в корне, а завершается во внутреннем узле, представляет собой план частичной разборки.

Дерево T(H) содержит данные для глубокого структурного анализа изделия. В частности, она позволяет оценить «глубину вложенности» детали или сборочной единицы в конструкцию. Это важная техническая характеристика для операций разборки, ремонта и технического обслуживания сложной технической системы.

Оценим «глубины вложенности» числом деталей, которые предварительно нужно удалить из состава изделия перед демонтажем данной детали. Будем считать все соединения разъемными.

Обозначим I корень дерева T(H). Нисходящую цепь с началом в корне и окончанием в некоторой внутренней вершине A обозначим (I,A), а длину этой цепи -l(I,A). Пусть искомая деталь -x. Найдем все максимальные цепи (I,A), такие, что  $x \notin A$ . Тогда оценкой структурной вложенности детали x в состав изделия является число  $\min_{x\notin A} l(I,A)$ . Так, глубина вложения детали с номером 9 (рис. 3) равна восьми.

Приведенными примерами не исчерпывается применение описанной комбинаторной модели для структурного анализа сложных изделий и генерации проектных решений в CAD и CAAP-системах. Так, в [36] предложен метод автоматизированного синтеза декомпозиций изделия на сборочные единицы. Он заключается в поиске иерархически упорядоченного множества, вписанного в И-ИЛИ-дерево T(H).

### Заключение.

- 1. Геометрическая координация элементов изделия это важнейшее конструктивное свойство, которое необходимо обеспечить в различных операциях технической подготовки производства: сборке, разборке, ремонте, регулировки и пр. В механических конструкциях она достигается при помощи базирования по внутренним конструкторским базам, которые, в общем случае, могут принадлежать нескольким различным деталям. Поэтому базирование это многоместное отношение, которое не способны точно описать бинарные математические структуры (графы, сети и матрицы). Корректной математической моделью механической структуры изделия (машины или прибора) служит *s*-гиперграф.
- 2. Разрезание *s*-гиперграфа это математическое описание операции разборки. На ранних этапах проектирования в CAD и CAAP-системах операции и планы сборки/разборки считаются взаимообратимыми. Поэтому разрезание это модель когерентной секвенциальной сборочной операции. В терминах разрезаний можно описать большое число проектных решений сборочного передела.
- 3. В работе предложен универсальный носитель проектной информации И-ИЛИ-дерево разрезаний гиперграфа. Доказана теорема о необходимых и достаточных условиях существования разрезаний. Показано, что этот носитель можно использовать для принятия различных проектных решений: планов сборки/разборки, структурного анализа конструкции, синтеза сборочных декомпозиций и др.

#### Список источников

1. Ghandi S., Masehian E. Review and taxonomies of assembly and disassembly path planning problems and approaches. Computer-Aided Design, 2015, vol. 67-68, pp. 58-86. DOI: 10.1016/j.cad.2015.05.001.

- 2. Божко А.Н. Методы искусственного интеллекта в автоматизированном проектировании процессов сборки / А.Н. Божко, С.В. Родионов // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн., 2016. №8. DOI: 10.7463/0816.0844719.
- 3. Rabemanantsoa M., Pierre S. An artificial intelligence approach for generating assembly sequence in CAD/CAM. Artificial Intelligence in engineering, 1996, vol. 10, no. 2, pp. 97-107, DOI: 10.1016/0954-1810(95)00018-6.
- Meng Y., Gu T., Chang L. Reasoning about assembly sequences based on description logic and rule. Intelligent Information Processing VI, IFIP Advances in information and communication technology, 2012, vol. 385, pp. 131-136, DOI: 10.1007/978-3-642-32891-6\_18.
- 5. Seow K., Devanathan R. Temporal logic programming for assembly sequence planning. Artificial Intelligence in Engineering, 1993, vol. 8, no. 4, pp. 253-263, DOI: 10.1016/0954-1810(93)90008-4.
- 6. Jung J., Billatos S. An expert system for assembly based on axiomatic design principles. Journal of Intelligent and robotic systems, 1993, vol. 8, no. 2, pp. 245-265, DOI: 10.1007/BF01257997.
- 7. Hsu Y., Tai P., Wang M. A knowledge-based engineering system for assembly sequence planning. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, vol. 55, no. 5, pp. 763-782, DOI: 10.1007/s00170-010-3093-5.
- 8. Bonneville F., Perrard C., Henriod J. A genetic algorithm to generate and evaluate assembly plans. 1995 INRIA/IEEE Symposium on Emerging Technologies and Factory Automation. Proceedings. ETFA, 1995, vol. 2, pp. 231-239, DOI: 10.1109/ETFA.1995.496663.
- 9. Hui W., et al. Assembly planning based on semantic modeling approach. Computers in industry, 2007, vol. 58, no. 3, pp. 227-239, DOI: 10.1016/j.compind.2006.05.002.
- 10. Zha X., Lim S., Fok S. Integrated knowledge-based assembly sequence planning. The International Journal of advanced manufacturing technology, 1998, vol. 14, no. 1, pp. 50-64, DOI: 10.1007/BF01179417.
- 11. Toussaint G. Movable separability of sets. Machine intelligence and pattern recognition, 1985, vol. 2, pp. 335-375, DOI: 10.1016/B978-0-444-87806-9.50018-9.
- 12. Krishnan S., Sanderson A. Reasoning about geometric constraints for assembly sequence planning. 1991 IEEE International conference on robotics and automation. Proceedings, 1991, vol. 1, pp. 776-782, DOI: 10.1109/ROBOT.1991.131680.
- 13. Su Q. Computer aided geometric feasible assembly sequence planning and optimizing. The International Journal of advanced manufacturing technology, 2007, vol. 33, no. 1, pp. 48-57, DOI: 10.1007/s00170-006-0658-4.
- 14. Woo T., Dutta D. Automatic disassembly and total ordering in three dimension. Journal of engineering for industry, 1991, vol. 113, no. 2, pp. 207-213, DOI: 10.1115/1.2899679.
- 15. Wan W., Harada K., Nagata K. Assembly sequence planning for motion planning. Assembly automation, 2018, vol. 38, no. 2, pp. 195-206, DOI: 10.1108/AA-01-2017-009.
- 16. Chang H., Li T.Y. Assembly maintainability study with motion planning. Proceedings of 1995 IEEE International conference on robotics and automation, 1995, vol. 1, pp. 1012-1019, DOI: 10.1109/ROBOT.1995.525415.
- 17. Morato C., Kaipa K.N., Gupta S.K. Improving assembly precedence constraint generation by utilizing motion planning and part interaction clusters. Computer-aided design, 2013, vol. 45, no. 11, pp. 1349-1364, DOI: 10.1016/j.cad.2013.06.005.
- 18. Sundaram S., Remmler I., Amato N.M. Disassembly sequencing using a motion planning approach. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International conference on robotics and automation (Cat. No.01CH37164), 2001, vol. 2, pp. 1475-1480, DOI: 10.1109/ROBOT.2001.932818.
- 19. Wan W., Harada K., Nagata K. Assembly sequence planning for motion planning. Assembly Automation, 2018, vol. 38, no. 2, pp. 195-206, DOI: 10.1108/AA-01-2017-009.
- 20. Mohd Fadzil F., Ab Rashid F. A Hybrid Ant-wolf algorithm to optimize assembly sequence planning problem. Assembly Automation, 2017, vol. 37, no. 2, DOI: 10.1108/AA-11-2016-143.
- 21. Lu C., Fuh J., Wong Y. Advanced assembly planning approach using a multi-objective genetic algorithm. Collaborative product assembly design and assembly planning, 2011, pp. 107-146, DOI: 10.1533/9780857093882.107.
- 22. Bahubalendruni R., Biswal B., Deepak B. Optimal robotic assembly sequence generation using particle swarm optimization. Journal of automation and control engineering, 2016, vol. 4, no. 2, pp. 89-95, DOI: 10.12720/joace.4.2.89-95.
- 23. Bourjault A. Methodology of Assembly Automation: A New Approach. Robotics and Factories of the Future '87, 1988, pp. 37-45, DOI: 10.1007/978-3-642-73890-6\_6.
- 24. De Fazio T., Whitney D. Simplified generation of all mechanical assembly sequences. IEEE Journal on robotics and automation, 1987, vol. 3, no. 6, pp. 640-658, DOI: 10.1109/JRA.1987.1087132.
- 25. Baldwin D., et al. An integrated computer aid for generating and evaluating assembly sequences for mechanical products. IEEE Transactions on robotics and automation, 1991, vol. 7, no. 1, pp. 78-94, DOI: 10.1109/70.68072.

- 26. Wilson R. Minimizing user queries in interactive assembly planning. IEEE Transactions on robotics and automation, 1995, vol. 11, no. 2, pp. 308-312, DOI: 10.1109/70.370514.
- 27. Xia P., Lopes A., Restivo M.T. A review of virtual reality and haptics for product assembly (part 1): rigid part. Assembly automation, 2013, vol. 33, no. 1, pp. 68-77, DOI: 10.1108/01445151311294784.
- 28. Seth A., Vance J., Oliver J. Virtual reality for assembly methods prototyping: a review. Virtual reality, 2011, vol. 15, no. 1, pp. 5-20, DOI: 10.1007/s10055-009-0153-y.
- 29. Jun Y., Liu J., Ning R., Zhang Y. Assembly process modeling for virtual assembly process planning. International Journal of computer integrated manufacturing, 2005, vol. 18, no. 6, pp. 442-451, DOI: 10.1080/09511920400030153.
- 30. Yuan X. An interactive approach of assembly planning. IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics part a: systems and humans, 2002, vol. 32, no. 4, pp. 522-526, DOI: 10.1109/TSMCA.2002.804822.
- 31. Wang L., et al. Assembly process planning and its future in collaborative manufacturing: a review. The International journal of advanced manufacturing technology, 2009, vol. 41, no. 1-2, pp. 132-144, DOI: 10.1007/s00170-008-1458-9.
- 32. Duda J. Formal Description of Integrated Process and Assembly System Planning. Advances in Manufacturing. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, 2018, pp. 79-89, DOI: 10.1007/978-3-319-68619-6\_8.
- 33. Subramani A., Dewhurst P. Automatic generation of product disassembly sequences. CIRP Annals Manufacturing Technology, 1991, vol. 40, no. 1, pp. 115-118, DOI: 10.1016/s0007-8506(07)61947-7.
- 34. Ben-Arieh D., Kramer B. Computer-aided process planning for assembly: generation of assembly operation sequence. International journal of production research, 1994, vol. 32, no. 3, pp. 643-656, DOI: 10.1080/00207549408956957.
- 35. Homem de Mello L., Sanderson A. A basic algorithm for the generation of mechanical assembly sequences. Computer-aided mechanical assembly planning, 1991, vol. 148, pp. 163-190, DOI: 10.1007/978-1-4615-4038-0\_7.
- 36. Bozhko A. Math Modeling of Sequential Coherent and Linear Assembly Plans in CAD Systems. 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC). IEEE, 2018, pp. 1-5, DOI: 10.1109/GloSIC.2018.8570090.
- 37. Bozhko A.N. Hypergraph model for assembly sequence problem. IOP Conference series: materials science and engineering, 2019, vol. 560, no. 1, p. 012010, DOI: 10.1088/1757-899x/560/1/012010.

**Божко Аркадий Николаевич.** Д.т.н., профессор, кафедра «Системы автоматизированного проектирования», МГТУ им. Н.Э. Баумана, AuthorID: 705712, SPIN: 8537-0010.

**Грошев Сергей владимирович.** Ст. преподаватель, кафедра «Системы автоматизированного проектирования», МГТУ им. Н.Э. Баумана, AuthorID: 699520, SPIN: 3783-9031.

**Кузьмина Инна Анатольевна.** К.т.н., доцент, кафедра «Системы автоматизированного проектирования», МГТУ им. Н.Э. Баумана, AuthorID: 898746, SPIN: 5270-4766.

**Родионов Сергей Владимирович.** Ст. преподаватель, кафедра «Системы автоматизированного проектирования», МГТУ им. Н.Э. Баумана, AuthorID: 797492, SPIN: 4583-2559.

UDC 004.94

DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.006

### Combinatorial model of product, based on hypergraph cutting

Arkadij N. Bozhko, Sergej V. Groshev, Inna A. Kuzmina, Sergej V. Rodionov

Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Russia, Moscow, *s.groshev@bmstu.ru* 

**Abstract.** The paper proposes a new mathematical model of a combinatorial type of product. It is formed on the basis of all possible correct cuts of a hypergraph of a mechanical structure into two connected subgraphs and is represented as an AND–OR-tree. This tree describes all the connected and coordinated product fragments and the inclusion ratio of such fragments. The model can be used to synthesize various design solutions for the technical

preparation of discrete production: assembly and disassembly plans, breakdowns into assembly units, etc. AND – OR-the tree of cuts provides objective information for in-depth structural analysis of complex technical systems.

**Keywords:** assembly, computer-aided design of the assembly process, displacement planning, state space, hypergraphic model

#### References

- 1. Ghandi S., Masehian E. Review and taxonomies of assembly and disassembly path planning problems and approaches. Computer-Aided Design, 2015, vol. 67-68, pp. 58-86. DOI: 10.1016/j.cad.2015.05.001.
- Bozhko A.N., Rodionov S.V. Metody iskusstvennogo intellekta v avtomatizirovannom proektirovanii protsessov sborki [Artificial intelligence methods in automated design of assembly processes]. Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana. Electron. zhurn. [Science and Education. Bauman Moscow State Technical University. Electronic Journal], 2016, no. 8. DOI: 10.7463/0816.0844719.
- 3. Rabemanantsoa M., Pierre S. An artificial intelligence approach for generating assembly sequence in CAD/CAM. Artificial Intelligence in engineering, 1996, vol. 10, no. 2, pp. 97-107, DOI: 10.1016/0954-1810(95)00018-6.
- 4. Meng Y., Gu T., Chang L. Reasoning about assembly sequences based on description logic and rule. Intelligent Information Processing VI, IFIP Advances in information and communication technology, 2012, vol. 385, pp. 131-136, DOI: 10.1007/978-3-642-32891-6\_18.
- 5. Seow K., Devanathan R. Temporal logic programming for assembly sequence planning. Artificial Intelligence in Engineering, 1993, vol. 8, no. 4, pp. 253-263, DOI: 10.1016/0954-1810(93)90008-4.
- 6. Jung J., Billatos S. An expert system for assembly based on axiomatic design principles. Journal of Intelligent and robotic systems, 1993, vol. 8, no. 2, pp. 245-265, DOI: 10.1007/BF01257997.
- 7. Hsu Y., Tai P., Wang M. A knowledge-based engineering system for assembly sequence planning. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, vol. 55, no. 5, pp. 763-782, DOI: 10.1007/s00170-010-3093-5.
- 8. Bonneville F., Perrard C., Henriod J. A genetic algorithm to generate and evaluate assembly plans. 1995 INRIA/IEEE Symposium on Emerging Technologies and Factory Automation. Proceedings. ETFA, 1995, vol. 2, pp. 231-239, DOI: 10.1109/ETFA.1995.496663.
- 9. Hui W., et al. Assembly planning based on semantic modeling approach. Computers in industry, 2007, vol. 58, no. 3, pp. 227-239, DOI: 10.1016/j.compind.2006.05.002.
- 10. Zha X., Lim S., Fok S. Integrated knowledge-based assembly sequence planning. The International Journal of advanced manufacturing technology, 1998, vol. 14, no. 1, pp. 50-64, DOI: 10.1007/BF01179417.
- 11. Toussaint G. Movable separability of sets. Machine intelligence and pattern recognition, 1985, vol. 2, pp. 335-375, DOI: 10.1016/B978-0-444-87806-9.50018-9.
- 12. Krishnan S., Sanderson A. Reasoning about geometric constraints for assembly sequence planning. 1991 IEEE International conference on robotics and automation. Proceedings, 1991, vol. 1, pp. 776-782, DOI: 10.1109/ROBOT.1991.131680.
- 13. Su Q. Computer aided geometric feasible assembly sequence planning and optimizing. The International Journal of advanced manufacturing technology, 2007, vol. 33, no. 1, pp. 48-57, DOI: 10.1007/s00170-006-0658-4.
- 14. Woo T., Dutta D. Automatic disassembly and total ordering in three dimension. Journal of engineering for industry, 1991, vol. 113, no. 2, pp. 207-213, DOI: 10.1115/1.2899679.
- 15. Wan W., Harada K., Nagata K. Assembly sequence planning for motion planning. Assembly automation, 2018, vol. 38, no. 2, pp. 195-206, DOI: 10.1108/AA-01-2017-009.
- 16. Chang H., Li T.Y. Assembly maintainability study with motion planning. Proceedings of 1995 IEEE International conference on robotics and automation, 1995, vol. 1, pp. 1012-1019, DOI: 10.1109/ROBOT.1995.525415.
- 17. Morato C., Kaipa K.N., Gupta S.K. Improving assembly precedence constraint generation by utilizing motion planning and part interaction clusters. Computer-aided design, 2013, vol. 45, no. 11, pp. 1349-1364, DOI: 10.1016/j.cad.2013.06.005.
- Sundaram S., Remmler I., Amato N.M. Disassembly sequencing using a motion planning approach. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International conference on robotics and automation (Cat. No.01CH37164), 2001, vol. 2, pp. 1475-1480, DOI: 10.1109/ROBOT.2001.932818.
- 19. Wan W., Harada K., Nagata K. Assembly sequence planning for motion planning. Assembly Automation, 2018, vol. 38, no. 2, pp. 195-206, DOI: 10.1108/AA-01-2017-009.
- 20. Mohd Fadzil F., Ab Rashid F. A Hybrid Ant-wolf algorithm to optimize assembly sequence planning problem. Assembly Automation, 2017, vol. 37, no. 2, DOI: 10.1108/AA-11-2016-143.
- 21. Lu C., Fuh J., Wong Y. Advanced assembly planning approach using a multi-objective genetic algorithm. Collaborative product assembly design and assembly planning, 2011, pp. 107-146, DOI: 10.1533/9780857093882.107.

- 22. Bahubalendruni R., Biswal B., Deepak B. Optimal robotic assembly sequence generation using particle swarm optimization. Journal of automation and control engineering, 2016, vol. 4, no. 2, pp. 89-95, DOI: 10.12720/joace.4.2.89-95.
- 23. Bourjault A. Methodology of Assembly Automation: A New Approach. Robotics and Factories of the Future '87, 1988, pp. 37-45, DOI: 10.1007/978-3-642-73890-6\_6.
- 24. De Fazio T., Whitney D. Simplified generation of all mechanical assembly sequences. IEEE Journal on robotics and automation, 1987, vol. 3, no. 6, pp. 640-658, DOI: 10.1109/JRA.1987.1087132.
- 25. Baldwin D., et al. An integrated computer aid for generating and evaluating assembly sequences for mechanical products. IEEE Transactions on robotics and automation, 1991, vol. 7, no. 1, pp. 78-94, DOI: 10.1109/70.68072.
- 26. Wilson R. Minimizing user queries in interactive assembly planning. IEEE Transactions on robotics and automation, 1995, vol. 11, no. 2, pp. 308-312, DOI: 10.1109/70.370514.
- 27. Xia P., Lopes A., Restivo M.T. A review of virtual reality and haptics for product assembly (part 1): rigid part. Assembly automation, 2013, vol. 33, no. 1, pp. 68-77, DOI: 10.1108/01445151311294784.
- 28. Seth A., Vance J., Oliver J. Virtual reality for assembly methods prototyping: a review. Virtual reality, 2011, vol. 15, no. 1, pp. 5-20, DOI: 10.1007/s10055-009-0153-y.
- 29. Jun Y., Liu J., Ning R., Zhang Y. Assembly process modeling for virtual assembly process planning. International Journal of computer integrated manufacturing, 2005, vol. 18, no. 6, pp. 442-451, DOI: 10.1080/09511920400030153.
- 30. Yuan X. An interactive approach of assembly planning. IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics part a: systems and humans, 2002, vol. 32, no. 4, pp. 522-526, DOI: 10.1109/TSMCA.2002.804822.
- 31. Wang L., et al. Assembly process planning and its future in collaborative manufacturing: a review. The International journal of advanced manufacturing technology, 2009, vol. 41, no. 1-2, pp. 132-144, DOI: 10.1007/s00170-008-1458-9.
- 32. Duda J. Formal Description of Integrated Process and Assembly System Planning. Advances in Manufacturing. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, 2018, pp. 79-89, DOI: 10.1007/978-3-319-68619-6\_8.
- 33. Subramani A., Dewhurst P. Automatic generation of product disassembly sequences. CIRP Annals Manufacturing Technology, 1991, vol. 40, no. 1, pp. 115-118, DOI: 10.1016/s0007-8506(07)61947-7.
- 34. Ben-Arieh D., Kramer B. Computer-aided process planning for assembly: generation of assembly operation sequence. International journal of production research, 1994, vol. 32, no. 3, pp. 643-656, DOI: 10.1080/00207549408956957.
- 35. Homem de Mello L., Sanderson A. A basic algorithm for the generation of mechanical assembly sequences. Computer-aided mechanical assembly planning, 1991, vol. 148, pp. 163-190, DOI: 10.1007/978-1-4615-4038-0-7.
- 36. Bozhko A. Math Modeling of Sequential Coherent and Linear Assembly Plans in CAD Systems. 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC). IEEE, 2018, pp. 1-5, DOI: 10.1109/GloSIC.2018.8570090.
- 37. Bozhko A.N. Hypergraph model for assembly sequence problem. IOP Conference series: materials science and engineering, 2019, vol. 560, no. 1, p. 012010, DOI: 10.1088/1757-899x/560/1/012010.

**Arkady Nikolaevich Bozhko.** Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Computer-Aided Design Systems, Bauman Moscow State Technical University, AuthorID: 705712, SPIN: 8537-0010.

**Sergey Vladimirovich Groshev.** Senior lecturer, Department of Computer-aided Design Systems, Bauman Moscow State Technical University, AuthorID: 699520, SPIN: 3783-9031.

Inna Anatolyevna Kuzmina. PhD, Associate Professor, Department of Computer-Aided Design Systems, Bauman Moscow State Technical University, AuthorID: 898746, SPIN: 5270-4766.

Sergey Vladimirovich Rodionov. Senior Lecturer, Department of Computer-Aided Design Systems, Bauman Moscow State Technical University, AuthorID: 797492, SPIN: 4583-2559.

Статья поступила в редакцию 23.06.2025; одобрена после рецензирования 14.10.2025; принята к публикации 09.11.2025.

The article was submitted 06/23/2025; approved after reviewing 10/14/2025; accepted for publication 11/09/2025.

УДК 519.2, 519.872

DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.007

# Моделирование производительности облачного узла при коррелированном характере нагрузки

### Пауль Светлана Владимировна, Назаров Анатолий Андреевич, Лапатин Иван Леонидович, Иванова Алёна Сергеевна

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, Томск, paulsv82@mail.ru

Аннотация. В статье предложено исследование математической модели, функционирование виртуальных машин в облачном узле. Математическая модель представлена в виде системы массового обслуживания с бесконечным числом приборов, каждый из которых соответствует одной виртуальной машине в узле. Моменты начала жизненного цикла каждой машины в узле моделируются марковским модулированным пуассоновским потоком событий, который учитывает коррелированный характер их запуска. Особенностью этой модели является зависимость интенсивности работы каждой виртуальной машины от их суммарного числа в узле. Этот эффект называется «деградацией скорости обслуживания», с помощью которого в модели учитывается конкуренция за ресурсы в облачных узлах. С одной стороны, это позволяет более точно описывать реальные вычислительные системы, с другой стороны, наличие такой зависимости скорости обслуживания от числа виртуальных машин в системе существенно усложняет процесс исследования таких математических моделей. Это приводит к потребности в разработке новых методов анализа систем с учетом деградации скорости обслуживания. Целью предложенной работы является получение аналитических выражений для расчета вероятностных характеристик модели облачного узла в виде системы массового обслуживания с интенсивностью работы виртуальных машин, зависящей от их общего числа в системе.

**Ключевые слова:** облачный узел, бесконечнолинейная система массового обслуживания, марковский модулированный пуассоновский поток, деградация скорости обслуживания, метод асимптотически диффузионного анализа

**Цитирование:** Пауль С.В. Моделирование производительности облачного узла при коррелированном характере нагрузки / С.В. Пауль, А.А. Назаров, И.Л. Лапатин, А.С. Иванова // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. − № 4(40). − С. 90-101. − DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.007.

Введение. Увеличение объемов современных информационных потоков происходит быстрее, чем развитие вычислительной техники. Поэтому все больше клиентов обращаются к облачным хранилищам и центрам обработки данных. Это связано с высокими финансовыми затратами на покупку и обслуживание необходимого количества оборудования требуемой мощности для обработки объема данных, в то время как использование облачных сервисов является экономически более целесообразным. Для компаний-поставщиков облачных услуг остро стоит проблема соблюдения баланса между техническим оснащением работы облачных узлов и сбалансированного распределения запросов от клиентов. Существующие алгоритмы, программы и методы моделирования и прогнозирования нагрузки не всегда решают проблему нехватки ресурсов системы, что приводит к падению производительности и качества обслуживания. При этом возникает так называемый эффект деградации производительности, скорости и качества обслуживания, связанный с неравномерной и недетерминированной нагрузкой, которую дает каждая виртуальная машина (ВМ) на узле. Это оказывает влияние на такие технические показатели, как пропускная способность, время отклика, утилизация ресурсов, надежность, доступность сетей связи. Данный эффект присущ и другим техническим системам с разделяемыми ресурсами, когда физические ресурсы передающего канала в процессе использования разделяются по времени между несколькими информационными потоками. При перегрузке вычислительных узлов, то есть значительном превышении запрашиваемого объема ресурсов по сравнению с имеющимися,

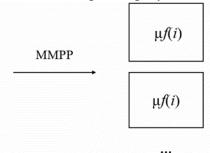
возникает конкуренция за ресурсы системы, что приводит к ухудшению качества обслуживания отдельно взятых пользователей. Это в конечном итоге может приводить к потере клиентов. С другой стороны, недостаточная загрузка узлов приводит к излишку ресурсов в виде их простоя, что также приводит к финансовым потерям, связанным, например, с покупкой и обслуживанием физических машин, затратами на электроэнергию и др. Таким образом, для эффективного использования системы с разделяемыми ресурсами, к которым относятся современные облачные системы, необходимо обеспечить баланс между загрузкой системы и поддержанием достаточного уровня производительности и качества обслуживания в рамках предоставляемых сервисов.

Для решения этой задачи в предложенной работе с помощью аппарата математического моделирования на основе методов теории массового обслуживания (ТМО) предлагается рассмотреть модель облачного узла в виде бесконечнолинейной системы массового обслуживания коррелированным входящим потоком (модель Марковского модулированного пуассоновского потока заявок – ММРР) с учетом эффекта возможной деградации производительности и качества обслуживания пользователей. ТМО давно себя как эффективный инструмент для моделирования производительности различных технических и экономических систем с разделяемыми ресурсами. Однако, эффект деградации производительности и качества обслуживания пользователей учитывается только в редких работах.

Самый популярный тип моделей, которые учитывают переменные параметры, это системы с параметрами, заданными ступенчатой функцией, когда, например, определяется некое пороговое значение количества ВМ на физической машине. Если количество ВМ меньше порога, то скорость обслуживания имеет одно значение, если больше – другое. Такой подход к моделированию используется в работах [1-3]. Другой метод заключается в использовании моделирования интенсивности обслуживания, интенсивности поступления запросов и времени ожидания (до начала обслуживания) в качестве зависимых случайных величин [4]. Этот метод довольно сложен для понимания и не выглядит полезным, так как на практике не удается аналитически задать или оценить зависимость между случайными величинами. В работе [5] изучены системы массового обслуживания с произвольным временем обслуживания, продолжительность которого зависит от объема незавершенной работы в системе на момент поступления заявок. Когда в системе имеется большой объем незавершенной работы, вновь прибывшие заявки вынуждены получать обслуживание низкого качества (т. е. короткое время обслуживания). В статье [5] разработан численный метод вычисления распределения вероятностей времени отклика (времени ожидания плюс времени обслуживания). Метод обладает простотой вычисления и широтой области применимости.

В предложенной работе приведено исследование математической модели облачного узла в виде системы массового обслуживания с бесконечным числом приборов, которые моделируют процесс работы ВМ в узле. Предполагается, что все ВМ могут работать на узле одновременно. Производительность каждой ВМ зависит от их общего числа, поскольку узел имеет ограниченные ресурсы (количество ядер ЦП, кеш память различного уровня, оперативную память) для их параллельного выполнения. Этот эффект описывается в системе функцией деградацией, моделирующей процесс снижения интенсивности обслуживания. Применение модели ММРР в качестве входящего потока позволяет учесть несколько режимов запуска ВМ на узле и их коррелированный характер. Событиями входящего потока предлагается моделировать моменты запуска ВМ. Целью исследования является нахождение распределения вероятностей числа ВМ в облачном узле, что позволит вычислять различные вероятностные характеристики предложенной модели.

**Математическая модель.** Рассмотрим систему массового обслуживания, на вход которой поступает Марковский модулированный пуассоновский поток заявок [6–8], моделирующий моменты запуска ВМ в облачном узле (рисунок 1). Переключение между состояниями в ММРР управляется цепью Маркова с непрерывным временем m(t) = 0, 1, ..., M. Генератор  $\mathbf{Q}_{dop} = [q_{vm}]$  для ММРР представляет собой матрицу, которая организована следующим образом: недиагональные элементы положительны и имеют смысл интенсивностей переходов из одного состояния в другое, диагональный элемент — это интенсивности выхода из текущего состояния, взятые с противоположным знаком. Таким образом, длительности пребывания в состояниях ММРР равны длительностям пребывания в состояниях управляющей цепи Маркова и подчиняются экспоненциальному распределению [9-11]. В интервалах, когда ММРР-поток находится в состоянии n, события наступают (запускаются ВМ) с интенсивностью  $\lambda_n$ , которые образуют диагональную матрицу  $\Lambda_{dop} = [\lambda_n]$ .



**Рис. 1.** Бесконечнолинейная система массового обслуживания с MMPP входящим потоком и деградацией скорости обслуживания

Каждая заявка входящего потока мгновенно попадает на прибор и начинает обслуживание, при этом параметр распределения времени обслуживания зависит от числа заявок в системе. Термин «обслуживание на приборе» описывает процесс функционирования в узле одной ВМ. Все ВМ могут работать одновременно на узле. Интенсивность обслуживания (определяющая длительность жизненного цикла ВМ в облачном узле) можно записать, как  $\mu f(i)$ , где  $\mu$  – интенсивность работы единственной ВМ в узле (без конкуренции), а f(i) – функция деградации, значения которой являются безразмерным коэффициентом снижения интенсивности работы ВМ в зависимости от их числа i в узле. Чем больше ВМ одновременно находится в облачном узле, тем ниже интенсивность их работы. На практике функцию деградации мы задаем функцией непрерывного аргумента, основываясь на результатах статистического анализа работы реального облачного узла. Например, в качестве функции деградации можно взять убывающую функцию непрерывного аргумента x в виде:

$$\tilde{f}(x) = \frac{1}{\sqrt{1+x}}$$
 (рисунок 2).

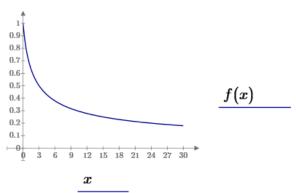


Рис. 2. Пример функции деградации скорости обслуживания

Обозначим процесс i(t) — число заявок в системе (число ВМ в облачном узле) в момент времени t. В предлагаемой работе ставится задача нахождения распределения вероятностей значений процесса i(t). Чтобы записать уравнения, описывающие функционирование облачного узла в терминах теории случайных процессов, необходимо рассматривать марковские процессы, для которых можно составлять системы дифференциальных уравнений Колмогорова. Процесс i(t) не является марковским процессом. Рассмотрим двумерный процесс  $\{m(t), i(t)\}$ , который уже является марковским процессом, и для его распределения вероятностей:

$$P(m, i, t) = P\{m(t) = m, i(t) = i\}$$
(1)

запишем систему дифференциальных уравнений Колмогорова:

$$\frac{\partial P(m,i,t)}{\partial t} = -P(m,i,t) \left( i\mu f(i) + \lambda_m \right) + P_m(i-1,t) \lambda_m + P(m,i+1,t) \left( i+1 \right) \mu f(i+1) + \sum_{i=1}^{M} P(v,i,t) q_{vm}$$
(2)

Решение системы (2) будем искать, применяя метод асимптотически диффузионного анализа в предельном условии высокоинтенсивного ММРР входящего потока, которое обеспечивается параметром T и предельными условиями

$$T \to \infty \text{ M } \mathbf{Q}_{dop} = \mathbf{Q}T, \Lambda_{dop} = \Lambda T.$$
 (3)

Предельное условие  $T \to \infty$  и  $\Lambda_{dop} = \Lambda T$  высокоинтенсивного входящего потока (высокой интенсивности запуска BM в облачном узле) означает, что время между моментами запуска BM в узле значительно меньше продолжительности ее жизненного цикла. Таким образом, в узле одновременно работают достаточно большое число BM. Условием  $\mathbf{Q}_{dop} = \mathbf{Q}T$  соотносятся при  $T \to \infty$  продолжительности интервалов постоянства при запуске BM с интенсивностями их запуска в узле и сохраняется структура входящего MMPP, с помощью которого описывается коррелированный характер начала жизненных циклов BM в узле.

Метод асимптотически диффузионного анализа реализуется в три этапа. На первом этапе находится функция a(x), которая характеризует среднее число заявок в системе (ВМ в узле). На втором этапе выводим формулы для вычисления функции b(x). На третьем этапе, применяя функции a(x) и b(x), показываем, что предельный процесс, описывающий число заявок в системе (числа ВМ в узле), является диффузионным. Для этого процесса находится предельная плотность распределения, на основе которой выполняется достаточно точная аппроксимация для допредельного дискретного распределения вероятностей числа ВМ в облачном узле с учетом деградации скорости их работы.

Применяя разработанный метод [12, 13], введем следующее обозначение и покажем, как строится функция дискретного аргумента f(i). Будем полагать, что изначально задана функция  $\tilde{f}(x)$  непрерывного аргумента x (рисунок 2). Исходную функцию f(i) дискретного аргумента i определим в виде  $f(i) = \tilde{f}\left(\frac{i}{T}\right)$ . Тогда, система (2) примет вид:

$$\frac{\partial P_{\scriptscriptstyle m}(i,t)}{\partial t} = -P_{\scriptscriptstyle m}(i,t) \left( i \mu \tilde{f} \left( \frac{i}{T} \right) + \lambda_{\scriptscriptstyle m} \right) + P_{\scriptscriptstyle m}(i-1,t) \lambda_{\scriptscriptstyle m} + P_{\scriptscriptstyle m}(i+1,t) (i+1) \mu \tilde{f} \left( \frac{i+1}{T} \right) + \sum_{\scriptscriptstyle \nu=1}^{M} P_{\scriptscriptstyle \nu}(i,t) q_{\scriptscriptstyle \nu m} \,. \label{eq:delta_model}$$

Последнюю систему перепишем в матричном виде, обозначив вектор-строку  $\mathbf{P}(i,t) = \{P(1,i,t),...,P(M,i,t)\}$ , тогда

$$\frac{\partial \mathbf{P}(i,t)}{\partial t} = \mathbf{P}(i,t) \left( \mathbf{Q}_{dop} - \mathbf{\Lambda}_{dop} - i\mu \tilde{f} \left( \frac{i}{T} \right) \mathbf{I} \right) + \mathbf{P}(i-1,t) \mathbf{\Lambda}_{dop} + \mathbf{P}(i+1,t)(i+1)\mu \tilde{f} \left( \frac{i+1}{T} \right). \tag{4}$$

Систему (4) перепишем в виде

$$\frac{1}{T} \frac{\partial \mathbf{P}(i,t)}{\partial t} = \mathbf{P}(i,t) \left( \mathbf{Q} - \mathbf{\Lambda} - \frac{i}{T} \mu \tilde{f} \left( \frac{i}{T} \right) \mathbf{I} \right) + \mathbf{P}(i-1,t) \mathbf{\Lambda} + \mathbf{P}(i+1,t) \frac{i+1}{T} \mu \tilde{f} \left( \frac{i+1}{T} \right). \tag{5}$$

Для реализации метода нам понадобится согласованное уравнение, которое получим путем домножения уравнения (5) на единичный вектор столбец **e**:

$$\frac{1}{T}\frac{\partial \mathbf{P}(i,t)}{\partial t}\mathbf{e} = -\mathbf{P}(i,t)\left(\mathbf{\Lambda} + \frac{i}{T}\mu\tilde{f}\left(\frac{i}{T}\right)\mathbf{I}\right)\mathbf{e} + \mathbf{P}(i-1,t)\mathbf{\Lambda}\mathbf{e} + \mathbf{P}(i+1,t)\frac{i+1}{T}\mu\tilde{f}\left(\frac{i+1}{T}\right)\mathbf{e}.$$
(6)

Решение системы (5)–(6) будем искать, реализуя метод асимптотически диффузионного анализа в предельном условии высокоинтенсивного входящего потока, которое обеспечивается условиями (3).

**Первый этап асимптотического анализа.** Обозначив  $1/T = \varepsilon$ , в системе (5)–(6) выполним следующие замены:

$$i/T = \varepsilon i = x, \mathbf{P}(i, t) = \mathbf{P}_1(x, t, \varepsilon).$$
 (7)

Запишем систему:

$$\varepsilon \frac{\partial \mathbf{P}_{1}(x,t,\varepsilon)}{\partial t} = \mathbf{P}_{1}(x,t,\varepsilon) \left( \mathbf{Q} - \mathbf{\Lambda} - x\mu \tilde{f}(x) \mathbf{I} \right) + \mathbf{P}_{1}(x-\varepsilon,t,\varepsilon) \mathbf{\Lambda} + \mathbf{P}_{1}(x+\varepsilon,t,\varepsilon) \left( x+\varepsilon \right) \mu \tilde{f}(x+\varepsilon), \tag{8}$$

$$\varepsilon \frac{\partial \mathbf{P}_{1}(x,t,\varepsilon)}{\partial t} \mathbf{e} = -\mathbf{P}_{1}(x,t,\varepsilon) \left( \mathbf{\Lambda} + x\mu \tilde{f}(x) \mathbf{I} \right) \mathbf{e} + \mathbf{P}_{1}(x-\varepsilon,t,\varepsilon) \mathbf{\Lambda} \mathbf{e} + \mathbf{P}_{1}(x+\varepsilon,t,\varepsilon) \left( x+\varepsilon \right) \mu \tilde{f}(x+\varepsilon) \mathbf{e} . \tag{9}$$

Решение системы (8)–(9) будем искать в предположении, что существует предел  $\lim_{\epsilon \to 0} \mathbf{P}_1(x,t,\epsilon) = \mathbf{P}_1(x,t)$ . Устремим параметр  $\epsilon \to 0$  в матричном уравнении (8), получим

однородное матричное уравнение  $P_1(x,t)Q = 0$ , решение которого запишем в виде:

$$\mathbf{P}_{1}(x,t) = \mathbf{r}\pi_{1}(x,t),\tag{10}$$

где  $\mathbf{r}$  — вектор стационарных вероятностей состояний входящего ММРР, который определяется системой  $\mathbf{r}\mathbf{Q}_{dop} = 0$ ,  $\mathbf{r}\mathbf{e} = 1$ . Далее вернёмся к уравнению (9), которое запишем с точностью до  $O(\varepsilon^2)$ , раскладывая в ряд Тейлора по приращению  $\varepsilon$  аргумента x:

$$\varepsilon \frac{\partial \mathbf{P}_{1}(x,t,\varepsilon)}{\partial t} \mathbf{e} = -\mathbf{P}_{1}(x,t,\varepsilon) \left( \mathbf{\Lambda} + x\mu \tilde{f}(x) \mathbf{I} \right) \mathbf{e} + \mathbf{P}_{1}(x,t,\varepsilon) \mathbf{\Lambda} \mathbf{e} - \varepsilon \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \mathbf{P}_{1}(x,t,\varepsilon) \mathbf{\Lambda} \mathbf{e} \right\} + \mathbf{P}_{1}(x,t,\varepsilon) x\mu \tilde{f}(x) \mathbf{e} + \varepsilon \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \mathbf{P}_{1}(x,t,\varepsilon) x\mu \tilde{f}(x) \mathbf{e} \right\} + O(\varepsilon^{2}).$$

Устремив  $\varepsilon \to 0$  в последнем равенстве, получим:

$$\frac{\partial \mathbf{P}_{1}(x,t)}{\partial t}\mathbf{e} = -\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \mathbf{P}_{1}(x,t) \left( \mathbf{\Lambda} \mathbf{e} - x \mu \tilde{f}(x) \mathbf{e} \right) \right\},\,$$

подставив в которое полученное выше равенство (10), запишем:

$$\frac{\partial \pi_1(x,t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \pi_1(x,t) \left( \mathbf{r} \Lambda \mathbf{e} - x \mu \tilde{f} \left( x \right) \right) \right\},\tag{11}$$

Уравнение (11) является вырожденным уравнением Фоккера—Планка для плотности распределения вероятностей  $\pi_1(x, t)$  предельного при  $\varepsilon \to 0$  процесса  $\varepsilon i(t)$ , который обозначим x(t). Заметим, что процесс i(t) при  $\varepsilon \to 0$  неограниченно возрастает. Процесс x(t) является диффузионным процессом с коэффициентом переноса a(x):

$$a(x) = \mathbf{r} \Lambda \mathbf{e} - x \mu \tilde{f}(x) \tag{12}$$

и нулевым коэффициентом диффузии. Запишем для него стохастическое дифференциальное уравнение, которое в силу вырожденности уравнения (11) является обыкновенным дифференциальным уравнением

$$dx(t) = \left(\mathbf{r}\Lambda\mathbf{e} - x\mu\tilde{f}\left(x\right)\right)dt = a(x)dt. \tag{13}$$

Нас будет интересовать не решение x(t) уравнения (13), а функция a(x). Ниже будет показано, что функция a(x) является коэффициентом переноса вспомогательного (аппроксимирующего) диффузионного процесса для числа ВМ в облачном узле.

**Второй этап асимптотического анализа.** Реализуя метод асимптотически диффузионного анализа на втором этапе, введем следующее обозначение  $1/T = \varepsilon^2$ , в системе (5)-(6) выполним замены:

$$i/T = \varepsilon^2 i = x + \varepsilon y, \mathbf{P}(i, t) = \mathbf{P}_2(y, t, \varepsilon).$$
 (14)

Запишем систему:

$$\epsilon^{2} \frac{\partial \mathbf{P}_{2}(y,t,\epsilon)}{\partial t} - \epsilon a(x) \frac{\partial \mathbf{P}_{2}(y,t,\epsilon)}{\partial y} = \mathbf{P}_{2}(y,t,\epsilon) \Big( \mathbf{Q} - \mathbf{\Lambda} - (x+\epsilon y) \mathbf{\mu} \tilde{f}(x+\epsilon y) \mathbf{I} \Big) + \\
+ \mathbf{P}_{2}(y-\epsilon,t,\epsilon) \mathbf{\Lambda} + \mathbf{P}_{2}(y+\epsilon,t,\epsilon) \Big( x+\epsilon (y+\epsilon) \Big) \mathbf{\mu} \tilde{f}(x+\epsilon (y+\epsilon)), \quad (15)$$

$$\epsilon^{2} \frac{\partial \mathbf{P}_{2}(y,t,\epsilon)}{\partial t} \mathbf{e} - \epsilon a(x) \frac{\partial \mathbf{P}_{2}(y,t,\epsilon)}{\partial y} \mathbf{e} = -\mathbf{P}_{2}(y,t,\epsilon) \Big( \mathbf{\Lambda} + (x+\epsilon y) \mathbf{\mu} \tilde{f}(x+\epsilon y) \mathbf{I} \Big) \mathbf{e} + \\
+ \mathbf{P}_{2}(y-\epsilon,t,\epsilon) \mathbf{\Lambda} \mathbf{e} + \mathbf{P}_{2}(y+\epsilon,t,\epsilon) \Big( x+\epsilon (y+\epsilon) \Big) \mathbf{\mu} \tilde{f}(x+\epsilon (y+\epsilon)) \mathbf{e} . \quad (16)$$

Уравнение (15) запишем с точностью до  $O(\varepsilon^2)$ , раскладывая в ряд Тейлора по приращениям  $\varepsilon$  аргумента y соответствующие функции:

$$-\varepsilon a(x) \frac{\partial \mathbf{P}_{2}(y,t,\varepsilon)}{\partial y} = \mathbf{P}_{2}(y,t,\varepsilon)\mathbf{Q} - \varepsilon \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \mathbf{P}_{2}(y,t,\varepsilon)\mathbf{\Lambda} \right\} + \varepsilon \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \mathbf{P}_{2}(y,t,\varepsilon) \left( x + \varepsilon y \right) \mu \tilde{f} \left( x + \varepsilon y \right) \right\} + O(\varepsilon^{2}).$$
(17)

Решение  $P_2(y, t, \varepsilon)$  системы (17) будем искать в виде:

$$\mathbf{P}_{2}(y,t,\varepsilon) = \pi_{2}(y,t)\mathbf{r} + \varepsilon \frac{\partial \pi_{2}(y,t)}{\partial y}\mathbf{g} + O(\varepsilon^{2}).$$
(18)

Тогда из уравнения (17) получим:

$$-\varepsilon a(x) \frac{\partial \pi_{2}(y,t)}{\partial y} \mathbf{r} = \varepsilon \frac{\partial \pi_{2}(y,t)}{\partial y} \mathbf{g} \mathbf{Q} - \varepsilon \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \pi_{2}(y,t) \mathbf{r} \mathbf{\Lambda} \right\} + \varepsilon \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \pi_{2}(y,t) \left( x + \varepsilon y \right) \mathbf{\mu} \tilde{f} \left( x + \varepsilon y \right) \mathbf{r} \right\} + O(\varepsilon^{2}).$$
(19)

Перейдем к пределу  $\epsilon \to 0$  в последнем равенстве, запишем:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left\{ \pi_2(y, t) \left( \mathbf{g} \mathbf{Q} - \mathbf{r} \mathbf{\Lambda} + x \mu \tilde{f}(x) \mathbf{r} + a(x) \mathbf{r} \right) \right\} = 0,$$

откуда получим неоднородную систему линейных алгебраических уравнений:

$$\mathbf{gQ} = \mathbf{r} \left( \mathbf{\Lambda} - x \mu \tilde{f} \left( x \right) \mathbf{I} - a(x) \mathbf{I} \right),$$

решение которой запишем в виде разложения:

$$\mathbf{g} = C\mathbf{r} + \mathbf{\varphi}$$
,

где вектор частных решений  $\phi$  удовлетворяет дополнительному условию  $\phi \mathbf{e} = 0$  и следующему матричному уравнению

$$\varphi \mathbf{Q} = \mathbf{r} \left( \mathbf{\Lambda} - x \mu \tilde{f} \left( x \right) \mathbf{I} - a(x) \mathbf{I} \right)$$
 (20)

Вернёмся к уравнению (16), которое запишем с точностью до  $O(\varepsilon^3)$ , раскладывая по приращениям  $\varepsilon$  аргумента y соответствующие функции:

$$\begin{split} \varepsilon \frac{\partial \mathbf{P}_{2}(y,t,\varepsilon)}{\partial t} \mathbf{e} - a(x) \frac{\partial \mathbf{P}_{2}(y,t,\varepsilon)}{\partial y} \mathbf{e} &= -\frac{\partial}{\partial y} \left\{ \mathbf{P}_{2}(y,t,\varepsilon) \mathbf{\Lambda} \mathbf{e} \right\} + \frac{\varepsilon}{2} \frac{\partial^{2}}{\partial y^{2}} \left\{ \mathbf{P}_{2}(y,t,\varepsilon) \mathbf{\Lambda} \mathbf{e} \right\} + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \mathbf{P}_{2}(y,t,\varepsilon) \left( x + \varepsilon y \right) \mathbf{\mu} \tilde{f} \left( x + \varepsilon y \right) \mathbf{e} \right\} + \frac{\varepsilon}{2} \frac{\partial^{2}}{\partial y^{2}} \left\{ \mathbf{P}_{2}(y,t,\varepsilon) \left( x + \varepsilon y \right) \mathbf{\mu} \tilde{f} \left( x + \varepsilon y \right) \mathbf{e} \right\} + O\left(\varepsilon^{2}\right). \end{split}$$

Подставим в последнее равенство разложение (18) и, раскладывая в ряд Тейлора по приращениям  $\varepsilon y$  аргумента x вероятности, с учетом (12) запишем равенство:

$$\frac{\partial \pi_{2}(y,t)}{\partial t} - a(x) \frac{\partial^{2}}{\partial y^{2}} \{ \pi_{2}(y,t) \mathbf{g} \mathbf{e} \} = -\frac{\partial^{2} \pi_{2}(y,t)}{\partial y^{2}} \left[ \mathbf{g} \left( \mathbf{\Lambda} - x \mu \tilde{f} \left( x \right) \mathbf{I} \right) \mathbf{e} \right] + \frac{1}{2} \frac{\partial^{2} \pi_{2}(y,t)}{\partial y^{2}} \left[ \mathbf{r} \left( \mathbf{\Lambda} + x \mu \tilde{f} \left( x \right) \mathbf{I} \right) \mathbf{e} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ y \pi_{2}(y,t) \frac{\partial \left( x \mu \tilde{f} \left( x \right) \right)}{\partial x} \right\} + \frac{\partial \pi_{2}(y,t)}{\partial t} = \frac{1}{2} \frac{\partial^{2} \pi_{2}(y,t)}{\partial y^{2}} \left[ \mathbf{r} \left( \mathbf{\Lambda} + x \mu \tilde{f} \left( x \right) \mathbf{I} \right) \mathbf{e} - 2 \mathbf{\phi} \left( \mathbf{\Lambda} - x \mu \tilde{f} \left( x \right) \mathbf{I} \right) \mathbf{e} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ y \pi_{2}(y,t) \frac{\partial \left( x \mu \tilde{f} \left( x \right) \right)}{\partial x} \right\}. \tag{21}$$

Если продифференцировать равенство (12) по x, получим соотношение  $a'(x) = -\frac{\partial \left(x \mu \tilde{f}\left(x\right)\right)}{\partial x}$ ,

которое присутствует в правой части уравнения (21), что позволяет его переписать в более компактном виде:

$$\frac{\partial \pi_2(y,t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial y} \left\{ y \pi_2(y,t) a'(x) \right\} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \pi_2(y,t)}{\partial y^2} \left[ \mathbf{r} \left( \mathbf{\Lambda} + x \mu \tilde{f}(x) \mathbf{I} \right) \mathbf{e} - 2 \mathbf{\phi} \left( \mathbf{\Lambda} - x \mu \tilde{f}(x) \mathbf{I} \right) \mathbf{e} \right]. \tag{22}$$

Уравнение (22) является уравнением Фоккера-Планка для плотности распределения вероятностей диффузионного процесса y(t) с коэффициентом переноса ya'(x) и коэффициентом диффузии:

$$b(x) = \mathbf{r} \left( \mathbf{\Lambda} + x \mu \tilde{f}(x) \mathbf{I} \right) \mathbf{e} - 2 \mathbf{\varphi} \left( \mathbf{\Lambda} - x \mu \tilde{f}(x) \mathbf{I} \right) \mathbf{e}.$$
 (23)

Тогда для диффузионного процесса y(t) мы можем записать определяющее его стохастическое дифференциальное уравнение:

$$dy(t) = ya'(x)dt + \mathbf{r}\sqrt{(\mathbf{\Lambda} + x\mu\tilde{f}(x)\mathbf{I})\mathbf{e} - 2\mathbf{\varphi}(\mathbf{\Lambda} - x\mu\tilde{f}(x)\mathbf{I})\mathbf{e}}dw(t). \tag{24}$$

тогда уравнение (24) перепишем в более компактном виде:

$$dy(t) = ya'(x)dt + \mathbf{r}\sqrt{b(x)}dw(t). \tag{25}$$

**Третий этап асимптотического анализа.** На первом и втором этапах реализации метода были сделаны замены (7) и (14), что аналогично рассмотрению некоторого вспомогательного диффузионного процесса:

$$z(t) = x(t) + \varepsilon y(t)$$
, где  $\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{T}}$ , (26)

на основе которого будет построена диффузионная аппроксимация распределения вероятностей значений процесса i(t), с помощью которого моделируется число ВМ в узле. Для построения аппроксимации сформулируем лемму и теорему.

**Лемма.** С точностью до  $O(\epsilon^2)$  случайный процесс z(t) является решением стохастического дифференциального уравнения

$$dz(t) = a(z)dt + \sqrt{\varepsilon^2 b(z)}dw(t). \quad (27)$$

**Доказательство.** Так как диффузионный процесс x(t) является решением стохастического дифференциального уравнения (13), а диффузионный процесс y(t) удовлетворяет уравнению (25), то в силу обозначений (23), (26), для процесса z(t) запишем равенство:

$$dz(t) = d(x(t) + \varepsilon y(t)) = (a(x) + \varepsilon ya'(x))dt + \varepsilon \sqrt{b(x)}dw(t) + O(\varepsilon^{2}).$$
(28)

Коэффициенты в равенстве (28) с учетом (27) запишем в виде разложений с точностью до  $O(\varepsilon^2)$ 

$$a(x) + \varepsilon y a'(x) = a(x + \varepsilon y) + O(\varepsilon^2) = a(z) + O(\varepsilon^2),$$

$$\varepsilon \sqrt{b(x)} = \varepsilon \sqrt{b(x+\varepsilon y) + O(\varepsilon)} = \varepsilon \sqrt{b(z)} + O(\varepsilon^2) = \sqrt{\varepsilon^2 b(z)} + O(\varepsilon^2),$$

С точностью до  $O(\varepsilon^2)$  равенство (28) можно переписать в виде:

$$dz(t) = a(z) + \sqrt{\varepsilon^2 b(z)} dw(t),$$

которое совпадает с (27). Лемма доказана.

Так как процесс z(t) является решением стохастического дифференциального уравнения, следовательно, этот процесс является диффузионным процессом с коэффициентом переноса a(z) и коэффициентом диффузии b(z). Будем называть его вспомогательным диффузионным процессом, на основе которого будет построена диффузионная аппроксимация распределения вероятностей числа ВМ в облачном узле.

Будем полагать, что исследуемая система функционирует в стационарном режиме, что позволяет рассмотреть стационарную плотность распределения вероятностей процесса z(t):

$$s(z,t) = s(z) = \frac{\partial P\{z(t) < z\}}{\partial z}.$$

Докажем следующее утверждение.

**Теорема.** Стационарная плотность распределения вероятностей s(z) случайного процесса z(t) имеет вид:

$$s(z) = \frac{C}{b(z)} \exp\left\{2T \int_0^z \frac{a(x)}{b(x)} dx\right\},\tag{29}$$

где C – нормирующая константа.

Доказательство. Сделаем обратные предельные замены:

$$\varepsilon = \frac{1}{T}$$
.

Согласно доказанной Лемме, диффузионный процесс z(t) с коэффициентом переноса a(z) и коэффициентом диффузии b(z) является решением стохастического дифференциального уравнения (27), следовательно, его стационарная плотность распределения вероятностей s(z) является решением уравнения Фоккера-Планка:

$$-\frac{\partial}{\partial z}\left\{a(z)s(z)\right\} + \frac{1}{2}\frac{\partial^2}{\partial z^2}\left\{\frac{1}{T}b(z)s(z)\right\} = 0,$$

которое, в свою очередь, является обыкновенным дифференциальным уравнением второго порядка. Решая это дифференциальное уравнение, учитывая краевое условие  $s(\infty) = 0$ , получим формулу для вычисления плотности распределения вероятностей s(z) нормированного числа заявок в системе, которая совпадает с (29). Теорема доказана.

**Точность диффузионной аппроксимации распределения вероятностей числа заявок.** Для реализации полученных предельных формул необходимо построить аппроксимацию дискретного распределения вероятностей P(i) числа i(t) ВМ в облачном узле

с ММРР потоком, который описывает моменты запуска ВМ и деградацию скорости их работы. Для перехода от плотности распределения s(z) вспомогательного диффузионного случайного процесса z(t) к дискретному распределению вероятностей значений P(i) случайного процесса i(t) запишем формулу для вычисления неотрицательной функции G(i) дискретного аргумента i в виде:

$$G(i) = \frac{C}{b\left(\frac{i}{T}\right)} \exp\left\{2T \int_0^{\frac{i}{T}} \frac{a(u)}{b(u)} du\right\}. \tag{30}$$

Запишем формулу для расчета дискретного распределения вероятностей числа ВМ в узле, принимая во внимание условие нормировки:

$$P(i) = \frac{G(i)}{\sum_{i=0}^{\infty} G(i)}, \quad (31)$$

которую будем называть диффузионной аппроксимацией распределения вероятностей числа ВМ в облачном узле.

Процесс построения аппроксимации изучаемого распределения описывается следующим алгоритмом.

- 1. Задаются значения параметров матриц изучаемой системы  $\Lambda_{dop}$ ,  $\mathbf{Q}_{dop}$ ,  $\mu$ , T, функция  $\tilde{f}(x)$  непрерывного аргумента x, из которой получаем значения функции дискретного аргумента  $f(i) = \tilde{f}\left(\frac{i}{T}\right)$ .
- 2. Находится стационарное распределение вероятностей **r** управляющего MMPP потоком процесса m(t), которое определяется системой уравнений  $\mathbf{rQ}_{dop} = 0$ ,  $\mathbf{re} = 1$ .
- 3. Вычисляется коэффициент переноса a(x) вспомогательного диффузионного процесса по формуле (12).
- 4. Находится вектор  $\phi$ , как решение матричного уравнения (20) при условии  $\phi e = 0$ .
- 5. Вычисляется коэффициент диффузии b(x) вспомогательного диффузионного процесса по формуле (23).
- 6. Вычисляется функция G(i) по формуле (30).
- 7. Строится дискретная аппроксимация распределения вероятностей P(i) числа заявок на орбите по формуле (31).

Определим следующие матрицы, характеризующие ММРР входящий поток:

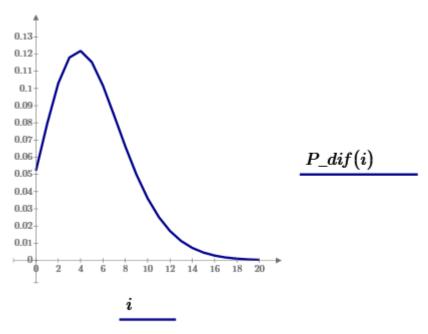
$$\mathbf{\Lambda}_{dop} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 6 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Q}_{dop} = \begin{bmatrix} -1 & 0.2 & 0.8 \\ 0.5 & -1.5 & 1 \\ 0.8 & 1.2 & -2 \end{bmatrix}.$$

Согласно формулам из работы [14], интенсивность входящего ММРР потока вычисляется по формуле  $\mathbf{r} \mathbf{\Lambda}_{dop} \mathbf{e} = 1,92$ , что характеризует число ВМ, запускаемых на облачном узле в единицу времени. Зададим величину  $\mu = 5$ , обратную среднему времени жизненного цикла одной ВМ при отсутствии других ВМ на процессоре; параметр высокой интенсивности входящего потока T = 10, функцию деградации скорости обслуживания определим в виде

$$\tilde{f}(x) = \frac{1}{\sqrt{1+x}}$$
 и соответствующую предельную функцию деградации  $\tilde{f}\left(\frac{i}{T}\right)$ . На рисунке 3

представлена диффузионная аппроксимация распределения вероятностей числа занятых

приборов в системе или, что тоже самое, числа ВМ в облачном узле с учетом предложенной функции деградации.



**Рис. 3.** Диффузионная аппроксимация распределения вероятностей числа BM в облачном узле

Как видно из этого примера, при интенсивности запуска ВМ в узле (около 20), распределение вероятностей числа ВМ в облаке имеет большую дисперсию, что приводит к увеличению вероятностей больших значений процесса. Соответственно использование модели входящего потока, которая учитывает не только интенсивность, но и характер запуска ВМ, позволяет более точно получать характеристики моделируемого процесса.

Заключение. В предложенной статье рассмотрена математическая модель облачного узла в виде бесконечнолинейной системы массового обслуживания с учетом зависимости скорости обслуживания заявок от числа занятых приборов, на вход которой на обслуживание поступает марковский модулированный пуассоновский поток сообщений, с помощью которого можно учитывать корреляцию интервалов между моментами запуска ВМ в узле. Ставилась задача нахождения распределения вероятностей числа занятых приборов в системе или, что то же самое, числа ВМ в узле, с помощью которого можно вычислять вероятностные характеристики системы, такие, как среднее и дисперсию, моменты и квантили заданного уровня. Именно число занятых приборов (число ВМ) определяет загрузку вычислительного узла, а соответственно, и уровень снижения скорости обслуживания. Информация о распределении числа занятых приборов напрямую дает нам представление о том, какую долю времени скорость обработки находилась на конкретном уровне. Это позволяет оценивать качество обслуживания при заданных не только интенсивности, но и характере нагрузки за счет использования непуассоновской модели входящего потока. В результате адаптации и реализации метода асимптотически диффузионного анализа было получено предельное в условии роста числа запущенных ВМ на узле распределение вероятностей числа работающих ВМ в облачном узле и построена его аппроксимация.

Авторы выражают благодарности рецензентам и редакции журнала за изучение статьи и ценные предложения и комментарии.

#### Список источников

1. Liu X., Li S., Tong W. A Queuing model considering resources sharing for cloud service performance. The Journal of supercomputing, 2015, vol. 71, no. 11, pp. 4042-4055, DOI:10.1007/s11227-015-1503-z.

- 2. Choudhary A., Chakravarthy S.R., Sharma D.C. Analysis of MAP/PH/1 queueing system with degrading service rate and phase type vacation. Mathematics, 2021, vol. 9, no. 19, p. 2387, DOI: 10.3390/math9192387.
- 3. Goswami V., Patra S., Mund G.B. Performance analysis of cloud with queue-dependent virtual machines. In 2012 1st International Conference on recent advances in information technology (RAIT), IEEE, 2012, pp. 357-362, DOI: 10.1109/RAIT.2012.6194446.
- 4. Morozov E. A General multiserver state-dependent queueing system. Centre de Recerca Matematica, 2010, vol. 927, p. 17.
- 5. Leung K.K. Load-dependent service queues with application to congestion control in broadband networks. Performance evaluation, 2002, vol. 50, no. 1, pp. 27-40, DOI: 10.1016/S0166-5316(02)00045-7.
- 6. Вишневский В.М. Стохастические системы с коррелированными потоками. Теория и применение в телекоммуникационных сетях / В. М. Вишневский, А.Н. Дудин, В.И. Клименок. М.: Техносфера, 2018. С. 564
- 7. Наумов В.А. О марковских и рациональных потоках случайных событий. I / В.А. Наумов, К.Е. Самуйлов Информатика и ее применение, 2020. Т. 14, вып. 3. С. 13-19.
- 8. Наумов В.А. О марковских и рациональных потоках случайных событий. II / В.А. Наумов, К.Е. Самуйлов Информатика и ее применение, 2020. Т. 14, вып. 4. С. 37-46.
- 9. Nazarov A., Moiseev A., Lapatin I. et al. Real waiting time in single-server resource queue with Markovian arrival process. Communications in computer and information science, 2023, vol. 1803, pp. 116-125, DOI:10.1007/978-3-031-32990-6 10.
- 10. Nazarov A., Paul S., Phung-Duc T., et al. Analysis of tandem retrial with common orbit and MMPP incoming flow. Lecture notes in computer science, 2022, vol. 13766, pp. 270-283, DOI:10.1007/978-3-031-23207-7 21.
- 11. Nazarov A., Paul S., Phung-Duc T., et al. Two-way communication retrial queue with markov modulated poisson input and multiple types of outgoing calls. Communications in computer and information science, 2022, vol. 1748, pp. 370-381, DOI:10.1007/978-3-031-30648-8\_29.
- 12. Nazarov A., Phung-Duc T., Paul S., et al. Diffusion limit for single-server retrial queues with renewal input and outgoing calls. Mathematics, 2022, vol. 10, no. 6, art. no. 948, 14 p., DOI:10.3390/math10060948.
- 13. Nazarov A., Paul S., Phung-Duc T., et al. Analysis of tandem retrial queue with common orbit and poisson arrival process. Lecture notes in computer science (including subseries Lecture notes in artificial intelligence and lecture notes in bioinformatics), 2021, vol. 13104, pp. 441–456, DOI:10.1007/978-3-030-91825-5\_27.
- 14. Nazarov A., Moiseev A., Lapatin I., et al. Multi-level MMPP as a model of fractal traffic. Communications in computer and information science, 2021, vol. 1391, pp. 61-77, DOI:10.1007/978-3-030-72247-0\_5.

**Пауль Светлана Владимировна.** Доктор физико-математических наук, доцент; профессор; каф. теории вероятностей и математической статистики, AuthorID: 533655, SPIN: 6250-1997, ORCID: 0000-0002-3681-0676, paulsv82@mail.ru.

**Назаров Анатолий Андреевич.** Доктор технических наук, профессор; профессор; каф. теории вероятностей и математической статистики AuthorID: 2954, SPIN: 1341-6014, ORCID: 0000-0002-5097-5629, nazarov.tsu@gmail.com.

**Лапатин Иван Леонидович.** Кандидат физико-математических наук; доцент; каф. прикладной информатики AuthorID: 587572, SPIN: 1869-3849, ORCID: 0000-0002-1198-2113, ilapatin@mail.ru.

**Иванова Алёна Сергеевна.** Бакалавр; каф. теории вероятностей и математической статистики. ORCID: 0009-0009-6688-4543, alenkaivas6@gmail.com.

UDC 519.2, 519.872

DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.007

### Modeling cloud node performance under correlated load conditions

Svetlana V. Paul, Anatoly A. Nazarov, Ivan L. Lapatin, Alyona S. Ivanova

National research Tomsk state university,

Russia, Tomsk, paulsv82@mail.ru

**Abstract.** The paper proposes a study of a mathematical model describing the operation of virtual machines in a cloud node. The mathematical model is presented as a queueing system with an infinite number of servers, each of which corresponds to a single virtual machine in a node. The lifecycle start times of each machine in a node are modeled by a Markovian Modulated Poisson Process, which takes into account the correlated nature of their launches. A distinctive feature of this model is the dependence of the operational intensity of each virtual machine on their total number in the node. This effect is called "service rate degradation," and it allows the model to account for competition for resources in cloud nodes. While this allows for a more accurate description of real computing

systems, the dependence of service rate on the number of virtual machines in a system significantly complicates the study of such mathematical models. This leads to the need to develop new methods for analyzing systems taking into account the degradation of the service rate and correlations between incoming requests. The purpose of the proposed work is to obtain analytical expressions for calculating the probabilistic characteristics of a cloud node in the form of a queueing system with the rate of processing requests depending on their total number in the system.

**Keywords:** cloud node, infinite queueing system, Markovian Modulated Poisson Process, service rate degradation, asymptotical diffusion analysis method

### References

- 1. Liu X., Li S., Tong W. A Queuing model considering resources sharing for cloud service performance. The Journal of supercomputing, 2015, vol. 71, no. 11, pp. 4042-4055, DOI:10.1007/s11227-015-1503-z.
- 2. Choudhary A., Chakravarthy S.R., Sharma D.C. Analysis of MAP/PH/1 queueing system with degrading service rate and phase type vacation. Mathematics, 2021, vol. 9, no. 19, p. 2387, DOI: 10.3390/math9192387.
- 3. Goswami V., Patra S., Mund G.B. Performance analysis of cloud with queue-dependent virtual machines. In 2012 1st International Conference on recent advances in information technology (RAIT), IEEE, 2012, pp. 357-362, DOI: 10.1109/RAIT.2012.6194446.
- 4. Morozov E. A General multiserver state-dependent queueing system. Centre de Recerca Matematica, 2010, vol. 927, p. 17.
- 5. Leung K.K. Load-dependent service queues with application to congestion control in broadband networks. Performance evaluation, 2002, vol. 50, no. 1, pp. 27-40, DOI: 10.1016/S0166-5316(02)00045-7.
- 6. Vishnevsky V.M., Dudin A.N., Klimenok V.I. Stokhasticheskie sistemy s korrelirovannymi potokami. Teoriya i primenenie v telekommunikatsionnykh setyakh [Stochastic Systems with Correlated Flows. Theory and Application in Telecommunication Networks]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2018, 564 p.
- 7. Naumov V.A., Samuylov K.E. O markovskikh i ratsional'nykh potokakh sluchaynykh sobytiy. I [On Markov and Rational Flows of Random Events. I]. Informatika i ee primenenie [Informatics and its Applications], 2020, vol. 14, iss. 3, pp. 13-19.
- 8. Naumov V.A., Samuylov K.E. O markovskikh i ratsional'nykh potokakh sluchaynykh sobytiy. II [On Markov and Rational Flows of Random Events. II]. Informatika i ee primenenie [Informatics and its Applications], 2020, vol. 14, iss. 4, pp. 37-46.
- 9. Nazarov A., Moiseev A., Lapatin I. et al. Real waiting time in single-server resource queue with Markovian arrival process. Communications in computer and information science, 2023, vol. 1803, pp. 116-125, DOI:10.1007/978-3-031-32990-6\_10.
- 10. Nazarov A., Paul S., Phung-Duc T., et al. Analysis of tandem retrial with common orbit and MMPP incoming flow. Lecture notes in computer science, 2022, vol. 13766, pp. 270-283, DOI:10.1007/978-3-031-23207-7\_21.
- 11. Nazarov A., Paul S., Phung-Duc T., et al. Two-way communication retrial queue with markov modulated poisson input and multiple types of outgoing calls. Communications in computer and information science, 2022, vol. 1748, pp. 370-381, DOI:10.1007/978-3-031-30648-8\_29.
- 12. Nazarov A., Phung-Duc T., Paul S., et al. Diffusion limit for single-server retrial queues with renewal input and outgoing calls. Mathematics, 2022, vol. 10, no. 6, art. no. 948, 14 p., DOI:10.3390/math10060948.
- 13. Nazarov A., Paul S., Phung-Duc T., et al. Analysis of tandem retrial queue with common orbit and poisson arrival process. Lecture notes in computer science (including subseries Lecture notes in artificial intelligence and lecture notes in bioinformatics), 2021, vol. 13104, pp. 441–456, DOI:10.1007/978-3-030-91825-5\_27.
- 14. Nazarov A., Moiseev A., Lapatin I., et al. Multi-level MMPP as a model of fractal traffic. Communications in computer and information science, 2021, vol. 1391, pp. 61-77, DOI:10.1007/978-3-030-72247-0\_5.

Paul Svetlana Vladimirovna. Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Associate Professor; Probability Theory and Mathematical Statistics Department. AuthorID: 533655, SPIN: 6250-1997, ORCID: 0000-0002-3681-0676, paulsv82@mail.ru.

Nazarov Anatolij Andreevich. Doctor of Technical Sciences; Professor; Professor; Probability Theory and Mathematical Statistics Department. AuthorID: 2954, SPIN: 1341-6014, ORCID: 0000-0002-5097-5629, nazarov.tsu@gmail.com

Lapatin Ivan Leonidovich. Ph.D. in Physics and Mathematics; Associate Professor; Department of Applied Informatics. AuthorID: 587572, SPIN: 1869-3849, ORCID: 0000-0002-1198-2113, ilapatin@mail.ru

Ivanova Alyona Sergeevna. Bachelor; Probability Theory and Mathematical Statistics Department. ORCID: 0009-0009-6688-4543, alenkaivas6@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 30.07.2025; одобрена после рецензирования 01.10.2025; принята к публикации 04.10.2025.

The article was submitted 07/30/2025; approved after reviewing 10/01/2025; accepted for publication 10/04/2025.

УДК 519.862.6

DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.008

# Повышение компетентности сотрудников налоговой службы в сфере информационной безопасности с использованием модели логистической регрессии

### Базилевский Михаил Павлович, Шаманова Анна Евгеньевна

Иркутский государственный университет путей сообщения, Россия, Иркутск, *mik2178@yandex.ru* 

Аннотация. Обеспечение высокой степени информационной безопасности налоговых органов Российской Федерации является актуальной задачей. Утечки персональных данных граждан из систем налоговых служб могут нанести серьезный ущерб как физическим, так и юридическим лицам. Довольно часто такие утечки возникают по вине сотрудников, поэтому важно на постоянной основе проводить работу, направленную на повышение компьютерной грамотности пользователей налоговых органов в области обращения с защищаемой информацией. Цель данной работы состоит в построении модели логистической регрессии компетентности специалистов одной налоговой службы Иркутской области в вопросах информационной безопасности. При моделировании для идентификации неизвестных параметров логистических регрессий применен метод максимального правдоподобия и метод, основанный на решении задачи линейного программирования. Для верификации моделей использованы критерий точности классификации, а также элементы ROC-анализа в виде кривых, отражающих компромисс между чувствительностью и специфичностью при различных порогах классификации. Интерпретация оценок регрессий проводилась с помощью отношения шансов. Для количественной оценки степени компетентности работников налоговой службы были разработаны специализированные тесты. Результаты идентификации моделей показали, что метод, основанный на линейном программировании, во всех случаях оказался лучше по точности классификации, чем метод максимального правдоподобия. С помощью наилучшей логистической регрессии выявлены факторы, оказывающие наиболее существенное влияние на уровень компетенции сотрудников налоговой службы. Это позволило разработать учебные материалы для конкретных категорий работников. В результате проведенных учебных мероприятий из 160-ти человек число сотрудников, успешно преодолевших порог в 70%, выросло с 90 до 150.

**Ключевые слова:** информационная безопасность, налоговая служба, логистическая регрессия, метод максимального правдоподобия, линейное программирование, ROC-анализ

**Цитирование:** Базилевский М.П. Повышение компетентности сотрудников налоговой службы в сфере информационной безопасности с использованием модели логистической регрессии / М.П. Базилевский, А.Е. Шаманова // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. − № 4(40). − C. 102-113. − DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.008.

Введение. Успех любого современного предприятия зависит от степени обеспечения его информационной безопасности (ИБ) [1]. Как отмечено в [2], в большинстве случаев нарушение целостности информационной составляющей предприятия происходит в связи с действиями непосредственно самих работников компании. Это связано с тем, что многие из них не всегда обладают элементарными знаниями о правилах безопасного обращения с информацией ограниченного доступа или не осознают важность конфиденциальной информации, а руководство не уделяет данному вопросу должного внимания [2]. Авторы работы [2] справедливо утверждают, что на сегодняшний день важно не только противодействовать умышленным воздействиям извне, но и постоянно прорабатывать с сотрудниками правила работы с внедряемыми технологиями, доводить до них целесообразность защиты информационных ресурсов предприятия.

Налоговые органы Российской Федерации в связи с внедрением электронного документооборота за последние годы стали гораздо сильнее подвержены новым угрозам ИБ [3]. Известно, что налоговые органы собирают различные виды персональных данных как физических, так и юридических лиц. Несмотря на то, что персональные данные граждан являются конфиденциальными и защищаются федеральным законом о персональных данных,

в системах налоговых служб периодически происходят утечки [3]. Такие утечки могут нанести серьезный ущерб как физическим, так и юридическим лицам. В работе [3] аналогично отмечается, что во многих организациях уделяется недостаточное количество времени обучению сотрудников основам ИБ; в [4] рекомендуется на постоянной основе проводить работу, направленную на повышение компьютерной грамотности пользователей налоговых органов в области обращения с защищаемой информацией.

В настоящее время методология математического моделирования активно применяется для построения моделей ИБ различных предприятий. Так, в [5] модель ИБ предприятия формализована в виде двух разных задач линейного программирования. В [6, 7] разработана и апробирована моделирующая программа для оценки эффективности работ по устранению инцидентов ИБ для корпоративной информационной системы. В [8] рассмотрена модель угроз ИБ «нарушитель — защитник», основанная на классической математической модели войны Ланкастера.

Моделируется ИБ предприятий и с использованием методов машинного обучения. Один из таких методов связан с построением логистической регрессии, представляющей собой зависимость выходной бинарной переменной от одной или нескольких входных переменных. Например, в [9] построена мультиномиальная логистическая регрессия для классификации пользователей—злоумышленников различного ранга. В [10] разработана логистическая регрессия для классификации сетевых атак на информационные ресурсы. Часто для идентификации неизвестных параметров логистической регрессии применяется метод максимального правдоподобия (ММП) [11]. Однако относительно недавно в [12, 13] был разработан новый метод оценки параметров логистической регрессии, основанный на использовании аппарата линейного программирования. Проведение сравнительного анализа функционирования этих двух методов является актуальной научной задачей. Для этого может быть реализован так называемый ROC-анализ [14, 15].

Цель данной статьи заключается в построении модели логистической регрессии для идентификации факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на компетентность специалистов Межрайонной инспекции Федеральной налоговой службы России по Иркутской области в вопросах ИБ.

**1.** Идентификация, верификация и интерпретация логистической регрессии. Пусть имеется выходная (объясняемая) переменная y, принимающая только 2 значения -0 и 1, и совокупность из l влияющих на неё входных (объясняющих) переменных  $x_1, x_2, ..., x_l$ , принимающих любые значения. Тогда для выборки объема n модель логистической регрессии с неизвестными параметрами  $\alpha_0, \alpha_1, ..., \alpha_l$  можно записать в следующем виде:

$$y_i = \left(1 + e^{-z_i}\right)^{-1} + \varepsilon_i, \qquad i = \overline{1, n}, \qquad (1)$$

где  $y_i$ ,  $i = \overline{1,n}$  — значения булевой переменной y;  $\varepsilon_i$ ,  $i = \overline{1,n}$  — ошибки регрессии; значения вспомогательной переменной z находятся по формуле:

$$z_i = \alpha_0 + \sum_{j=1}^l \alpha_j x_{ij}, \qquad i = \overline{1, n}, \qquad (2)$$

в которой  $x_{ij}$ ,  $i = \overline{1,n}$ ,  $j = \overline{1,l}$  — значения переменных  $x_1, x_2, ..., x_l$ .

Функция  $\left(1+e^{-z}\right)^{-1}$  в выражении (1) называется сигмоидой. Она принимает значение 0,5 при z=0, значение 0 при  $z\to-\infty$ , значение 1 при  $z\to\infty$ . Таким образом, идентифицированная логистическая регрессия (1), (2) позволяет прогнозировать вероятность появления некоторого события в зависимости от значений объясняющих переменных. Тем самым можно классифицировать принадлежность объекта к одному из двух классов.

Для идентификации неизвестных параметров  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$ , ...,  $\alpha_l$  логистической регрессии (1), (2) довольно часто применяется метод максимального правдоподобия (ММП) [11]. Его суть состоит в том, чтобы максимизировать так называемую функцию правдоподобия. Описание ММП можно найти во многих книгах по математической статистике. Для реализации ММП по реальным статистическим данным может быть использован эконометрический пакет Gretl.

В работе [12] предложен другой метод идентификации неизвестных параметров логистической регрессии (1), (2). Он состоит из двух этапов. На первом этапе решается задача линейного программирования с целевой функцией:

$$\sum_{i=1}^{n} u_i \to \min, \tag{3}$$

с линейными ограничениями (2) и:

$$z_i \ge r - u_i, \qquad i \in I_1, \tag{4}$$

$$z_i \le -r + u_i, \qquad i \in I_0, \tag{5}$$

$$u_i \ge 0, \qquad i = \overline{1, n}, \tag{6}$$

где  $I_0$ ,  $I_1$  — индексные множества, состоящие из номеров наблюдений, в которых фактическое значение выходной переменной y равно 0 и 1 соответственно; r — заданное исследователем положительное число;  $u_i$  — ошибка классификации в i-м наблюдении. В [12] показано, что число r влияет на масштаб оцениваемых параметров, но на результаты классификации не влияет. Также в [12] отмечено, что схожую формулировку задачи линейного программирования можно встретить в работах, посвященных оценке кредитоспособности заемщиков (см., например, [16]).

На втором этапе при условии несовершенной классификации, т.е. при  $\sum_{i=1}^n u_i \neq 0$ , проводится калибровка масштаба вероятностей для оценки неизвестного параметра  $\beta$  в логистической регрессии:

$$y_i = \left(1 + e^{-\beta \cdot z_i^*}\right)^{-1} + \varepsilon_i, \qquad i = \overline{1, n}, \qquad (7)$$

где  $z_i^*$ ,  $i=\overline{1,n}$  — найденные на первом этапе значения переменной z, по следующему алгоритму:

*Шаг 1.* Назначить близкое к единице число  $\Delta$ . Например,  $\Delta$ =0,99,  $\Delta$ =0,999 или  $\Delta$ =0,9999. *Шаг 2.* Вычислить оценку параметра  $\beta$  по формуле:

$$\beta^* = \begin{cases} -\frac{1}{z_{\text{max}}} \ln\left(\frac{1-\Delta}{\Delta}\right), \text{ если } |z_{\text{min}}| < |z_{\text{max}}|, \\ -\frac{1}{z_{\text{min}}} \ln\left(\frac{1-\Delta}{\Delta}\right), \text{ если } |z_{\text{min}}| > |z_{\text{max}}|, \end{cases}$$
(8)

где  $z_{\min} = \min\left\{z_1^*, z_2^*, ..., z_n^*\right\}, \ z_{\max} = \max\left\{z_1^*, z_2^*, ..., z_n^*\right\}.$ 

Для решения задачи линейного программирования (2) - (6) может быть использован решатель LPSolve.

Пусть оцененная с помощью ММП модель логистической регрессии имеет вид

$$\tilde{y} = \left(1 + e^{-z}\right)^{-1},\tag{9}$$

$$z = \alpha_0^* + \sum_{j=1}^{l} \alpha_j^* x_j , \qquad (10)$$

где  $\alpha_0^*$ ,  $\alpha_1^*$ , ...,  $\alpha_l^*$  – найденные оценки неизвестных параметров;  $\tilde{y}$  – прогнозное значение выходной переменной y. Отметим, что при использовании второго метода оценивания выражение (9) с учётом (7) будет иметь вид  $\tilde{y} = \left(1 + e^{-\beta^* \cdot z}\right)^{-1}$ , где оценка  $\beta^*$  находится по формуле (8).

При верификации, т.е. при проверке адекватности построенной логистической регрессии (9), (10), главным критерием служит точность классификации CA (classification accuracy). Для её вычисления сначала задают порог классификации, например, 0,5, затем с использованием модели (9), (10) проводят классификацию, и, наконец, определяют значение критерия CA по формуле

$$CA = \frac{n^+}{n} \cdot 100\% ,$$

где  $n^+$  — число корректно классифицированных случаев.

Довольно часто в исследованиях для верификации логистической регрессии (9), (10) применяется ROC-анализ (см, например, [14, 15, 17]). ROC-кривая — графическое представление компромисса между чувствительностью и специфичностью при различных порогах классификации. Как отмечено в [17], чувствительность (истинноположительная частота) показывает вероятность классифицировать объект как 1, если его фактическое значение действительно 1. Специфичность (ложноположительная частота) показывает вероятность классифицировать объект как 0, если его фактическое значение действительно 0. При идеальной классификации ROC-кривая стремится к точке в верхнем левом углу графика. Количественной характеристикой ROC-анализа служит критерий AUC (агеа under curve), численно равный площади фигуры под ROC-кривой. Критерий AUC принимает значения от 0 до 1. При AUC = 0 модель классифицирует объекты абсолютно неверно, при AUC = 0,5 модель работает как случайный классификатор, а при AUC = 1 модель классифицирует объекты абсолютно верно. В [17] подчеркивается, что если значение AUC от 0,9 до 1, то качество модели превосходное, от 0,8 до 0,9 – очень хорошее, от 0,7 до 0,8 – хорошее и т.д.

Существуют и другие метрики для верификации логистических регрессий. Например, в [18] использована метрика F1-score, вычисляемая через Precision (точность) и Recall (полноту). Однако F1-score имеет смысл использовать для несбалансированных выборок, в которых существенно преобладают объекты одного из двух классов. В данной статье построение логистической регрессии будет осуществляться по сбалансированной выборке.

Интерпретация оценок логистической регрессии (9), (10) проводится через отношения шансов OR (odds ratio). Для поиска отношений шансов, как отмечено в [19, 20], необходимо провести экспонирование оценок. Например, экспонированная при переменной  $x_1$  оценка в уравнении (10) составляет  $OR(x_1) = e^{\alpha_1^*}$ . Эта величина показывает, во сколько раз изменится шанс возникновения изучаемого события, если значение переменной  $x_1$  изменится на единицу при фиксированных значениях прочих предикторов. Если OR = 1, то предиктор не влияет на шансы. Если OR > 1, то увеличение предиктора повышает шансы события, а если OR < 1, то снижает шансы события.

**2.** Моделирование компетентности сотрудников налоговой службы в сфере ИБ. Предварительно было проведено тестирование (тест №1), включающее 20 вопросов с 4-мя вариантами ответа, и анкетирование 160-ти сотрудников Межрайонной инспекции Федеральной налоговой службы России по Иркутской области, что позволило оценить исходный уровень их знаний в сфере ИБ. В результате была сформирована выборка статистических данных объема n = 160 по следующим переменным:

у – результат теста №1 (в %);

 $x_1$  – пол сотрудника (1 – мужской, 0 – женский);

 $x_2$  – возраст сотрудника;

 $x_3$  – стаж сотрудника;

 $x_4$  — заработная плата сотрудника;

 $x_5$  – тип работы (1 – работа связана с IT, 0 – не связана).

Сначала по собранным данным в пакете Gretl была построена с помощью метода наименьших квадратов модель множественной линейной регрессии:

$$\tilde{y} = 67,071 + 2,605x_1 + 0,115x_2 + 0,964x_3 - 0,000151x_4 + 4,545x_5$$

коэффициент детерминации  $R^2$  которой составил 0,288, что говорит о весьма низком качестве оцененной модели.

Тогда было решено перейти к построению логистической регрессии, а вместо y использовать бинарную переменную  $y_1$ , значения которой были найдены по правилу:

овать ойнарную переменную 
$$y_1$$
, значения которой обли наидены по правилу.
$$y_{i1} = \begin{cases} 1, & \text{если результат теста №1 для i-го сотрудника не менее 70%,} \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} i = \overline{1,160}.$$

Для оценки неизвестных параметров логистической регрессии использовались 2 метода: - ММП (метод №1) и метод, основанный на решении задачи линейного программирования (2) - (6) (метод №2).

С помощью метода №1 в Gretl была построена логистическая регрессия вида:

$$\begin{cases}
\tilde{y}_{1} = (1 + e^{-z_{1}})^{-1}, \\
z_{1} = -0,397 + 0,269 x_{1} - 0,013 x_{2} + 0,335 x_{3} - 3,156 \cdot 10^{-5} x_{4} + 1,377 x_{5}, \\
(0,7276) & (0,8344) & (0,0007)
\end{cases} (11)$$

где в скобках под коэффициентами указаны р-значения для установления значимости оценок. Чем меньше р-значение, тем значимее коэффициент. Для уровня значимости 0,1 значимыми оказались оценки при переменных  $x_3$  и  $x_5$ .

Точность классификации для модели (11) CA = 69,4%, а значение критерия AUC = 0,758.

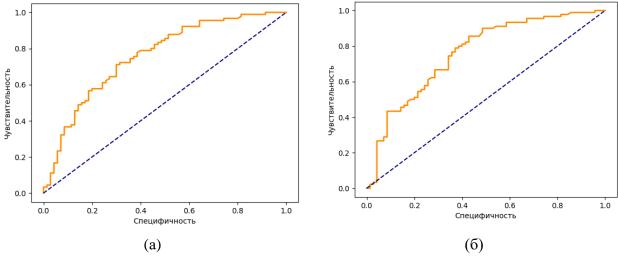
С помощью метода N2 с использованием пакета LPSolve при r = 0.01 была построена логистическая регрессия вида:

$$\begin{cases}
\tilde{y}_{1} = \left(1 + e^{-238,1078z_{2}}\right)^{-1}, \\
z_{2} = -0,0127 + 0,00165x_{1} + 0,0000456x_{2} + 0,00268x_{3} - 0,0000002x_{4} + 0,0145x_{5}.
\end{cases} (12)$$

Значение 238,1078 в выражении (12) найдено по формуле (8) при  $\Delta$  = 0,999. К сожалению, при использовании метода №2 пока отсутствует алгоритм проверки значимости полученных оценок.

Для модели (12) CA = 70,6%, AUC = 0,760. Таким образом, по обоим критериям метод №2 оказался лучше, чем метод №1.

ROC-кривая для модели (11) представлена на рис. 1(а), для модели (12) — на рис. 1(б). Оранжевым цветом на рис. 1 изображена ROC-кривая, а синей пунктирной линией — классификатор, который не лучше случайного угадывания. Для построения ROC-кривых была использована написанная на языке программирования Python программа, листинг которой приведен в [21].



**Рис. 1.** ROC-кривые для моделей (11) и (12)

Поскольку качество логистической регрессии (12) по обоим критериям всё же оставляет желать лучшего, было решено перестроить модель двумя методами, расширив список предикторов следующими фиктивными переменными:

 $d_1$  для отдела ИБ (1 – сотрудник отдела ИБ, 0 – другого отдела);

 $d_2$  для отдела работы с заявителями;

 $d_3$  для отдела работы с информационными ресурсами;

 $d_4$  для отдела учёта физических и юридических лиц;

 $d_5$  для отдела регистрации;

 $d_6$  для отдела кадров;

 $d_7$  для юридического отдела;

 $d_8$  для общего отдела.

В связи с тем, что для каждого i-го наблюдения из 160-ти справедливо равенство

$$d_{i1} + d_{i2} + d_{i3} + d_{i4} + d_{i5} + d_{i6} + d_{i7} + d_{i8} = 1,$$

то включить все фиктивные переменные в модель не получится из-за совершенной мультиколлинеарности, поэтому было решено исключить переменную  $d_8$  из рассмотрения.

С помощью метода №1 была построена логистическая регрессия вида:

$$\begin{cases}
\tilde{y}_{1} = (1 + e^{-z_{3}})^{-1}, \\
z_{3} = 3,576 - 0,0246 x_{1} - 0,0833 x_{2} + 0,417 x_{3} - 0,0004 \\
-2,613 \cdot 10^{-5} x_{4} + 1,571 x_{5} - 1,218 d_{1} - 3,564 d_{2} - 0,0018 \\
-2,008 d_{3} - 3,566 d_{4} - 3,308 d_{5} - 3,797 d_{6} - 2,426 d_{7}.
\end{cases} (13)$$

Для модели (13) CA = 74,4%, AUC = 0,814.

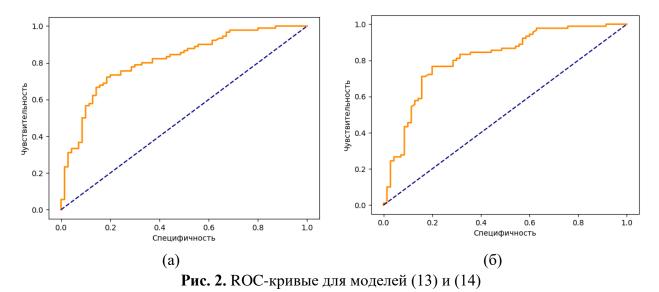
С помощью метода №2 была построена логистическая регрессия вида:

$$\tilde{y}_{1} = \left(1 + e^{-136,1304z_{4}}\right)^{-1}, 
z_{4} = 0,0173 + 0,00658x_{1} - 0,000776x_{2} + 0,00366x_{3} - 
-1,39 \cdot 10^{-7}x_{4} + 0,0176x_{5} - 0,00381d_{1} - 0,0187d_{2} - 
-0,00653d_{3} - 0,0261d_{4} - 0,0259d_{5} - 0,021d_{6} - 0,0122d_{7}.$$
(14)

Для модели (14) CA = 75,6%, AUC = 0,813. Таким образом, по критерию CA метод №2 вновь оказался лучше, чем метод №1. Однако по критерию AUC метод №2 оказался

незначительно хуже, чем метод №1. В целом за счёт привлечения дополнительных переменных модели (13) и (14) оказались лучше, чем (11) и (12).

ROC-кривая для модели (13) представлена на рис. 2(a), для модели (14) – на рис. 2(б).



Исходя из вышеизложенного следует, что лучшей из четырех моделей по точности классификации СА оказалась логистическая регрессия (14), построенная методом №2. Однако в ней проблематично оценить значимость оценок. Поэтому лучшей на данном этапе была признана логистическая регрессия (13).

Как видно по р-значениям, в модели (13) не все коэффициенты значимы. Было решено исключить незначимые оценки, используя встроенную в пакет Gretl процедуру автоматического исключения. Для этого порог р-значения был взят 0,1. В результате исключения в логистической регрессии осталось 8 переменных:  $x_3$ ,  $x_4$ ,  $x_5$ ,  $d_2$ ,  $d_4$ ,  $d_5$ ,  $d_6$ ,  $d_7$ . Точность классификации CA составила 76,3%. Анализ корреляционной матрицы для оставшихся в модели 8-ми переменных показал, что наиболее тесно и с большим отрывом от других пар предикторов коррелируют  $x_3$  (стаж) и  $x_4$  (заработная плата). Значение коэффициента корреляции между ними оказалось 0,8038. Поэтому с целью снижения эффекта мультиколлинеарности было принято решение исключить одну из этих двух переменных. При исключении  $x_3$  точность CA значительно уменьшилась до 67,5%, а при исключении  $x_4$  даже увеличилась. В итоге была идентифицирована логистическая регрессия без переменной  $x_4$  вида:

$$\tilde{y}_{1} = \left(1 + e^{-z_{5}}\right)^{-1},$$

$$z_{5} = -0.613 + 0.217 x_{3} + 1.076 x_{5} - 2.333 d_{2} - 0.00964$$

$$-1.814 d_{4} - 1.644 d_{5} - 2.057 d_{6} - 1.214 d_{7}.$$

$$(0.0041) \quad (0.0127) \quad (0.0877) \quad (0.0499)$$
(15)

Для модели (15) CA = 76,9%, AUC = 0,804. По критерию CA логистическая регрессия (15) превосходит все построенные в данной работе зависимости. Значение 0,804 критерия AUC говорит о том, что регрессия классифицирует объекты очень хорошо. Все входящие в модель (15) предикторы слабо коррелируют между собой, что подтверждает отсутствие эффекта мультиколлинеарности. Все коэффициенты регрессии (15) значимы для уровня значимости 0,1.

Используя отношения шансов OR, дадим интерпретацию коэффициентов логистической регрессии (15) в порядке уменьшения степени их значимости.

- 1. Отношение шансов для самой значимой переменной  $x_3$  (стаж сотрудника) находится по формуле  $OR(x_3) = e^0.217 = 1,242$ . Это означает, что с увеличением стажа сотрудника на 1 год, шанс на успешную сдачу теста №1 возрастает в 1,242 раза (на 24,2%).
- 2. Для переменной  $d_4$  (отдел учёта физических и юридических лиц)  $OR(d_4) = e^{-1,814} = 0,163$ . Это означает, что для сотрудников из данного отдела шанс на успешную сдачу теста №1 снижается на 83,7%.
- 3. Для переменной  $d_2$  (отдел работы с заявителями)  $OR(d_2) = e^{(-2,333)} = 0,097$ . Это значит, что для сотрудников из данного отдела шанс на успешную сдачу теста №1 снижается на 90,3%.
- 4. Для переменной  $d_5$  (отдел регистрации)  $OR(d_5) = e^{-1.644} = 0.193$ . Это значит, что для сотрудников из данного отдела шанс на успешную сдачу теста №1 снижается на 80.7%.
- 5. Для переменной  $d_7$  (юридический отдел)  $OR(d_7) = e^{-1}$ ,  $e^{-1}$ ,
- 6. Для переменной  $d_6$  (отдел кадров)  $OR(d_6) = e^{(-2,057)} = 0,128$ . Это означает, что для сотрудников из данного отдела шанс на успешную сдачу теста №1 снижается на 87,2%.
- 7. Для наименее значимой переменной  $x_5$  (тип работы)  $OR(x_5) = e^{(1,076)} = 2,932$ . Это значит, что для сотрудников, работа которых связана с IT, шанс на успешную сдачу теста №1 возрастает в 2,932 раза, т.е. на 193,2%.

Таким образом, анализ модели логистической регрессии (15) показал, что важно заострить особое внимание на сотрудниках, работающих в отделе учёта физических и юридических лиц, в отделе работы с заявителями и в отделе регистрации. Для сотрудников этих отделов целесообразно провести учебные мероприятия, нацеленные на обучение основам ИБ. Для этого был разработан специализированный курс по ИБ, направленный на развитие навыков работы с современными технологиями. Проведенное обучение сотрудников налоговой службы продемонстрировало положительные результаты. После завершения образовательного курса был проведен тест №2, содержащий уже другие 20 вопросов с 4-мя вариантами ответа. Для обеспечения отсутствия систематической ошибки были приняты следующие меры: прохождение теста было ограничено по времени (30 минут), было запрещено использовать внешние источники, тестирование проводилось анонимно, чтобы сотрудники не боялись негативных последствий за низкий результат, вопросы в тесте были составлены именно для проверки фактических знаний и навыков в сфере ИБ. Обработка результатов теста №2 показала, что средний процент верных ответов на вопросы увеличился с 70,9% до 82,3%. Причём, число сотрудников, успешно преодолевших порог в 70%, увеличилось с 90 до 150 человек, что свидетельствует о повышении уровня профессиональной подготовки сотрудников налоговой службы в сфере ИБ.

Заключение. На основе проведенного исследования получены следующие результаты.

- 1. Для организации тестирования работников налоговой службы разработаны специализированные тестовые материалы (тест №1 и тест №2). С помощью разработанных тестов количественно оценен уровень компетентности сотрудников в сфере ИБ, что способствовало использованию в рамках данного исследования методов регрессионного анализа.
- 2. С использованием двух методов построены логистические регрессии компетентности сотрудников налоговой службы. Метод №2 (основанный на линейном программировании) во всех случаях оказался лучше по точности классификации, чем метод №1 (ММП), но при использовании метода №2 отсутствует механизм проверки значимости полученных коэффициентов, что требует дальнейших исследований. Поэтому лучшей была выбрана модель, полученная с помощью ММП.

- 3. По наилучшей модели идентифицированы факторы, оказывающие наиболее существенное влияние на уровень компетенции сотрудников налоговой службы, что позволило разработать учебные материалы для конкретных категорий сотрудников.
- 4. В результате проведенных учебных мероприятий было организовано повторное тестирование (тест №2), показавшее, что из 160 сотрудников число человек, успешно преодолевших порог в 70%, выросло с 90 до 150 человек, что подтверждает эффективность проведенного обучения.

#### Список источников

- 1. Мамаева Л.Н. Основные направления обеспечения информационной безопасности предприятия / Л.Н. Мамаева, О.А. Кондратьева // Информационная безопасность регионов, 2016. № 2 (23). С. 5-9.
- 2. Гудкова О.В. Информационная безопасность предприятия: угрозы и вызовы в условиях цифровизации / О.В. Гудкова, Я.Г. Тананыкина // Экономика. Социология. Право, 2020. № 4 (20). С. 9-14.
- 3. Бобылев Е.А. Проблемы информационной безопасности персональных данных в налоговой сфере / Е.А. Бобылев, Г.Н. Ардашева // Современные тенденции и инновации в науке и производстве, 2023. С. 407.1-407.5
- 4. Бойко Н.Н. Обеспечение информационной безопасности в системе налоговых органов / Н.Н. Бойко // Актуальные проблемы финансового права в эпоху цифровизации, 2022. С. 46-50.
- 5. Базилевский М.П. Формализация модели информационной безопасности предприятия в виде многокритериальной задачи линейного программирования / М.П. Базилевский, П.Н. Наседкин // Моделирование, оптимизация и информационные технологии, 2023. − Т. 11. − № 3 (42). − DOI: 10.26102/2310-6018/2023.42.3.021.
- 6. Краковский Ю.М. Влияние вероятностных моделей работ, связанных с защитой информации, на значения показателей эффективности / Ю.М. Краковский, В.П. Киргизбаев // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2024. № 3 (35). С. 112-119. DOI: 10.25729/ESI.2024.35.3.010.
- 7. Краковский Ю.М. Моделирующая программа для оценки финансового состояния денежного фонда с учетом отдельных работ по устранению инцидентов информационной безопасности / Ю.М. Краковский, В.П. Киргизбаев // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. № 2 (38). С. 74-82. DOI: 10.25729/ESI.2025.38.2.006.
- 8. Рыбкина О.В. Построение модели угроз безопасности информации на основе математической модели Ланкастера / О.В. Рыбкина // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран ATP в XXI веке, 2021. Т. 1. С. 252-257.
- 9. Черкасов А.Н. Разработка вербальной модели кибердевианта при исследовании онлайн-сообществ на основе мультиномиальной логистической регрессии / А.Н. Черкасов, Е.А. Туркин, А.В. Чемулова // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки, 2021. № 1 (276). С. 40-47.
- 10. Кажемский М.А. Многоклассовая классификация сетевых атак на информационные ресурсы методами машинного обучения / М.А. Кажемский, О.И. Шелухин // Труды учебных заведений связи, 2019. Т. 5. № 1. С. 107-115. DOI: 10.31854/1813-324X-2019-5-1-107-115.
- 11. Бабешко Л.О. Сравнительный анализ результатов оценивания логистической регрессии в рамках метода максимального правдоподобия и байесовского подхода / Л.О. Бабешко // Современная математика и концепции инновационного математического образования, 2019. Т. 6. № 1. С. 82-89.
- 12. Базилевский М.П. Метод оценивания логистических регрессий с помощью аппарата линейного программирования / М.П. Базилевский, А.А. Малыгин, А.Е. Шаманова // Вестник кибернетики, 2024. Т. 23. № 2. С. 14-22. DOI: 10.35266/1999-7604-2024-2-2.
- 13. Базилевский М.П. Решение задачи распознавания DOS-атаки по сетевому трафику с использованием нового метода оценивания логистических регрессий / М.П. Базилевский, А.Е. Шаманова, А.А. Малыгин // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике, 2024. С. 10-15.
- 14. Беляев А.М. ROC-анализ и логистическая регрессия в MedCalc / А.М. Беляев, А.Е. Михнин, М.А. Рогачёв. Санкт-Петербург: НМИЦ онкологии им. Н.Н. Петрова, 2023. 36 с.
- 15. Потапова Н.Л. Информативность ROC-анализа в определении предикторов тяжелой бронхиальной астмы у детей / Н.Л. Потапова, Ю.Н. Смоляков // Забайкальский медицинский вестник, 2024. № 3. C. 13-18. DOI:  $10.52485/19986173\_2021\_3\_13.$
- 16. Никаненкова В.В. Кредитный скоринг как инструмент оценки кредитоспособности заемщиков / В.В. Никаненкова // Вестник Адыгейского государственного университета, серия «Экономика», 2012. № 2. С. 32-38.

- 17. Хрустачева М.Ю. Применение ROC-анализа для оценки результатов работы систем поддержки принятия врачебных решений на примере цифровых маммографических изображений / М.Ю. Хрустачева, Ю.А. Васильев, А.П. Памова, К.М. Арзамасов // Медицинская визуализация, 2025. DOI: 10.24835/1607-0763-1508.
- 18. Balboa A., Cuesta A., González-Villa J., Ortiz G., Alvear D. Logistic regression vs machine learning to predict evacuation decisions in fire alarm situations. Safety science, 2024, vol. 174, p. 106485, DOI: 10.1016/j.ssci.2024.106485.
- 19. Матраева Л.В. Использование логистической регрессии при выявлении приоритетов региональной инвестиционной политики в отношении иностранных инвесторов в регионы РФ / Л.В. Матраева // Статистика и экономика, 2013. № 6. С. 170-174.
- 20. Lee S.W. Regression analysis for continuous independent variables in medical research: statistical standard and guideline of Life Cycle Committee. Life cycle, 2022, DOI: 10.54724/lc.2022.e3.
- 21. Разбираемся в ROC и AUC. URL: https://habr.com/ru/companies/otus/articles/809147/ (дата обращения: 13.06.2025)

**Базилевский Михаил Павлович.** Кандидат технических наук, доцент кафедры «Математика», Иркутский государственный университет путей сообщения. AuthorID: 679277, SPIN: 4347-5028, ORCID: 0000-0002-3253-5697, mik2178@yandex.ru. 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15.

**Шаманова Анна Евгеньевна**. Магистрант кафедры «Информационные системы и защита информации», Иркутский государственный университет путей сообщения. AuthorID: 1316595, SPIN: 9068-8958, ORCID: 0009-0009-2196-2042, anutashamanova056@mail.ru. 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15.

UDC 519.862.6

DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.008

# Improving the competence of tax service employees in the field of information security using a logistic regression model

Mikhail P. Bazilevskiy, Anna E. Shamanova

Irkutsk state transport university,

Russia, Irkutsk, mik2178@yandex.ru

Abstract. Ensuring a high level of information security for the tax authorities of the Russian Federation is an urgent task. Leaks of personal data from tax service systems can cause serious harm to both individuals and legal entities. Quite often, such leaks occur due to the fault of employees. So it is important to constantly carry out work aimed at improving the computer literacy of tax authorities' users in the field of handling protected information. The purpose of this work is to construct a logistic regression model for the competence of specialists in information security issues at one tax service in the Irkutsk region. When modeling to identify unknown parameters in logistic regressions, maximum likelihood method and method based on solving linear programming problem were used. To verify the models, a classification accuracy criterion was used as well as ROC analysis elements in the form of curves reflecting a compromise between sensitivity and specificity at different classification thresholds. The interpretation of regression estimates was carried out using the odds ratio. Specialized tests were developed to assess the degree of competence of employees in the tax service. The results of model identification showed that the method based on linear programming had better classification accuracy in all cases compared to the maximum likelihood method. The best logistic regression revealed the factors that have the greatest impact on the level of competence among tax service employees. This made it possible to develop training materials for specific categories of employees. As a result of the training events, the number of employees who successfully overcame the 70% threshold increased from 90 to 150 out of a total of 160 people.

**Keywords:** information security, tax service, logistic regression, maximum likelihood method, linear programming, ROC analysis

#### References

- 1. Mamaeva L.N., Kondrat'eva O.A. Osnovnye napravleniya obespecheniya informatsionnoy bezopasnosti predpriyatiya [Main ways of ensuring corporate information security]. Informatsionnaya bezopasnost' regionov [Information security of regions], 2016, no. 2 (23), pp. 5-9.
- 2. Gudkova O.V., Tananykina Ya.G. Informatsionnaya bezopasnost' predpriyatiya: ugrozy i vyzovy v usloviyakh tsifrovizatsii [Enterprise information security: Threats and challenges in the context of digitalization]. Ekonomika. Sotsiologiya. Pravo [Economics. Sociology. Law], 2020, no. 4 (20), pp. 9-14.
- 3. Bobylev E.A., Ardasheva G.N. Problemy informatsionnoy bezopasnosti personal'nykh dannykh v nalogovoy sfere [Problems of information security of personal data in the tax sphere]. Sovremennye tendentsii i innovatsii v nauke i proizvodstve [Modern trends and innovations in science and production], 2023, pp. 407.1-407.5.
- 4. Boyko N.N. Obespechenie informatsionnoy bezopasnosti v sisteme nalogovykh organov [Ensuring information security in the tax authority system]. Aktual'nye problemy finansovogo prava v epokhu tsifrovizatsii [Current issues of financial law in the era of digitalization], 2022, pp. 46-50.
- 5. Bazilevskiy M.P., Nasedkin P.N. Formalizatsiya modeli informatsionnoy bezopasnosti predpriyatiya v vide mnogokriterial'noy zadachi lineynogo programmirovaniya [Formalization of the enterprise information security model in the multicriteria linear programming problem form]. Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii [Modeling, optimization and information technologies], 2023, vol. 11, no. 3 (42), DOI: 10.26102/2310-6018/2023.42.3.021.
- 6. Krakovskiy Yu.M., Kirgizbaev V.P. Vliyanie veroyatnostnykh modeley rabot, svyazannykh s zashchitoy informatsii, na znacheniya pokazateley effektivnosti [The impact of probabilistic models of works related to information protection on the values of performance indicators]. Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2024, no. 3 (35), pp. 112-119, DOI: 10.25729/ESI.2024.35.3.010.
- 7. Krakovskiy Yu.M., Kirgizbaev V.P. Modeliruyushchaya programma dlya otsenki finansovogo sostoyaniya denezhnogo fonda s uchetom otdel'nykh rabot po ustraneniyu intsidentov informatsionnoy bezopasnosti [Simulation program for assessing the financial health of a monetary fund accounting for specific information-security incident remediation activities]. Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2025, no. 2 (38), pp. 74-82, DOI: 10.25729/ESI.2025.38.2.006.
- 8. Rybkina O.V. Postroenie modeli ugroz bezopasnosti informatsii na osnove matematicheskoy modeli Lankastera [Construction information security threat model based on Lancaster's mathematical model]. Nauchnotekhnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke [Scientific, technical and economic cooperation of Asia-Pacific countries in the 21st century], 2021, vol. 1, pp. 252-257.
- 9. Cherkasov A.N., Turkin E.A., Chemulova A.V. Razrabotka verbal'noy modeli kiberdevianta pri issledovanii onlayn-soobshchestv na osnove mul'tinomial'noy logisticheskoy regressii [Development of a verbal cyber deviant model in the study of online communities based on multinomial logistic regression]. Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 4: Estestvenno-matematicheskie i tekhnicheskie nauki [Bulletin of Adyghe State University. Mathematical and technical sciences], 2021, no. 1 (276), pp. 40-47.
- 10. Kazhemskiy M.A., Shelukhin O.I. Mnogoklassovaya klassifikatsiya setevykh atak na informatsionnye resursy metodami mashinnogo obucheniya [Multiclass classification of attacks to information resources with machine learning techniques]. Trudy uchebnykh zavedeniy svyazi [Proceedings of telecommunication universities], 2019, vol. 5, no. 1, pp. 107-115, DOI: 10.31854/1813-324X-2019-5-1-107-115.
- 11. Babeshko L.O. Sravnitel'nyy analiz rezul'tatov otsenivaniya logisticheskoy regressii v ramkakh metoda maksimal'nogo pravdopodobiya i bayesovskogo podkhoda [Comparative analysis of the results of the assessment of logistic regression in the framework of the maximum likelihood method and the Bayesian approach]. Sovremennaya matematika i kontseptsii innovatsionnogo matematicheskogo obrazovaniya [Modern mathematics and concepts of innovative mathematical education], 2019, vol. 6, no. 1, pp. 82-89.
- 12. Bazilevskiy M.P., Malygin A.A., Shamanova A.E. Metod otsenivaniya logisticheskikh regressiy s pomoshch'yu apparata lineynogo programmirovaniya [Method for estimating logistic regressions using linear programming apparatus]. Vestnik kibernetiki [Proceedings in cybernetics], 2024, vol. 23, no. 2, pp. 14-22, DOI: 10.35266/1999-7604-2024-2-2.
- 13. Bazilevskiy M.P., Shamanova A.E., Malygin A.A. Reshenie zadachi raspoznavaniya DOS-ataki po setevomu trafiku s ispol'zovaniem novogo metoda otsenivaniya logisticheskikh regressiy [Solving the problem of Dos attack recognition by network traffic using a new method of estimating logistic regressions]. Problemy informatiki v obrazovanii, upravlenii, ekonomike i tekhnike [Problems of informatics in education, management, economics and engineering], 2024, pp. 10-15.

- 14. Belyaev A.M., Mikhnin A.E., Rogachev M.A. ROC-analiz i logisticheskaya regressiya v MedCalc [ROC Analysis and Logistic Regression in MedCalc]. Saint Petersburg, NMITs onkologii im. N.N. Petrova, 2023, 36 p.
- 15. Potapova N.L., Smolyakov Yu.N. Informativnost' ROC-analiza v opredelenii prediktorov tyazheloy bronkhial'noy astmy u detey [Informative value of ROC analysis in determining predictors of severe bronchial asthma in children]. Zabaykal'skiy meditsinskiy vestnik [Transbaikalian medical bulletin], 2024, no. 3, pp. 13-18, DOI: 10.52485/19986173\_2021\_3\_13.
- 16. Nikanenkova V.V. Kreditnyy skoring kak instrument otsenki kreditosposobnosti zaemshchikov [Credit scoring as a tool of an estimation of borrowers' creditworthiness]. Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta, seriya "Ekonomika" [Bulletin of the Adyghe State University, series "Economics"], 2012, no. 2, pp. 32-38.
- 17. Khrustacheva M.Yu, Vasil'ev Yu.A., Pamova A.P., et al. Primenenie ROC-analiza dlya otsenki rezul'tatov raboty sistem podderzhki prinyatiya vrachebnykh resheniy na primere tsifrovykh mammograficheskikh izobrazheniy [ROC analysis for clinic decision support systems (CDSS) results in digital mammography images]. Meditsinskaya vizualizatsiya [Medical Visualization], 2025, DOI: 10.24835/1607-0763-1508.
- 18. Balboa A., Cuesta A., González-Villa J., Ortiz G., Alvear D. Logistic regression vs machine learning to predict evacuation decisions in fire alarm situations. Safety science, 2024, vol. 174, p. 106485, DOI: 10.1016/j.ssci.2024.106485.
- 19. Matraeva L.V. Ispol'zovanie logisticheskoy regressii pri vyyavlenii prioritetov regional'noy investitsionnoy politiki v otnoshenii inostrannykh investorov v regiony RF [Use of logistic regression in identifying priorities for regional investment policy in respect of foreign investors in the regions of the Russian Federation]. Statistika i ekonomika [Statistics and Economics], 2013, no. 6, pp. 170-174.
- 20. Lee S.W. Regression analysis for continuous independent variables in medical research: statistical standard and guideline of Life Cycle Committee. Life cycle, 2022, DOI: 10.54724/lc.2022.e3.
- 21. Razbiraemsya v ROC i AUC [Understanding ROC and AUK], available at: https://habr.com/ru/companies/otus/articles/809147/ (accessed: 06/13/2025).

Bazilevskiy Mikhail Pavlovich. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mathematics, Irkutsk State Transport University. AuthorID: 679277, SPIN: 4347-5028, ORCID: 0000-0002-3253-5697, mik2178@yandex.ru. 664074, Russia, Irkutsk, Chernyshevskogo str., 15.

Shamanova Anna Evgen'evna. Master's Student of the Department of Information Systems and Security Information, Irkutsk State Transport University. Author ID: 1316595, SPIN: 9068-8958, ORCID: 0009-0009-2196-2042, anutashamanova056@mail.ru. 664074, Russia, Irkutsk, Chernyshevskogo str., 15.

Статья поступила в редакцию 17.06.2025; одобрена после рецензирования 21.09.2025; принята к публикации 29.09.2025.

The article was submitted 06/17/2025; approved after reviewing 09/21/2025; accepted for publication 09/29/2025.

# Математические, информационные и интеллектуальные технологии в энергетике

УДК 338.45:620.9(470)

DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.009

# Информационная система поддержки управляющих решений в сфере энергетической безопасности децентрализованных энергорайонов

## Киушкина Виолетта Рафиковна<sup>1</sup>, Лукутин Борис Владимирович<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Российское энергетическое агентство Минэнерго России, Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина, Россия, Москва, *Kiushkina@rosenergo.gov.ru* <sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, Томск

Аннотация. Предлагается информационная система, позволяющая оперативно представить численные результаты показателей энергетической безопасности с выбором оптимального варианта построения децентрализованного энергетического комплекса. Архитектура системы позволяет моделировать различные ситуации и визуализировать индикативные показатели энергетической безопасности территории или объекта, в результате последствий аварийных ситуаций, изменения структуры автономных систем электроснабжения, например, введением возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и т.д. Набор и сочетание выбранных модулей в разработанной системе мониторинга состояния энергетической безопасности удаленных и изолированных территорий позволяет осуществлять систематический контроль его уровня. Итоговым этапом функционирования информационноаналитической системы является определение рациональных и эффективных, с точки зрения укрепления энергетической безопасности, мероприятий. Исследуемые энергозоны со специфическими особенностями существования не имеют должной способности «сопротивляться» воздействиям угроз энергетической безопасности природного или территориального характера, поэтому модуль сигнализации системы об уровне состояния энергетической безопасности позволяет оценить степень кризисности ситуации и предложить переход к одному из видов механизмов воздействия по ее улучшению. Оперативный мониторинг сопровождается определением предполагаемых отдельных результирующих эффектов для предложенного комплекса мероприятий. Разработанная информационно-аналитическая система позволяет, в интегрированной среде оценки уровня энергетической безопасности, производить расчеты текущих показателей индикаторов энергетической безопасности с учетом специфики децентрализованных территорий Севера и Арктических зон. Алгоритм выявления и оценки слабых и уязвимых мест энергетической безопасности обеспечивает определение приоритетных территорий с жесткими требованиями по обеспечению комфортных условий жизнедеятельности потребителей электроэнергии. Модель и инструментарий диагностики децентрализованных территорий могут быть использованы как на существующих децентрализованных объектах и территориях, так и на прединвестиционной стадии цикла мероприятий по повышению уровня энергетической безопасности.

**Ключевые слова:** информационная система, структура, алгоритм, аналитический модуль, мониторинг, энергетическая безопасность, локальная энергетика, децентрализованное электроснабжение

**Цитирование:** Киушкина В.Р. Информационная система поддержки управляющих решений в сфере энергетической безопасности децентрализованных энергорайонов / В.Р. Киушкина, Б.В. Лукутин // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. — № 4(40). — С.114-127. — DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.009.

Введение. Напряженное состояние функционирования систем децентрализованного электроснабжения объективно обусловлено специфическими особенностями их географического расположения и состояния региональной экономики, которые уже сами по себе порождают ряд локальных рисков в области энергетической безопасности (далее – ЭнБ). Если централизованная энергетика в таких случаях способна сохранять живучесть, то децентрализованная энергетика изолированных труднодоступных территорий (далее – ИТТ), отличающаяся низкими показателями энергоэффективности, имеет реальные риски перехода к критическому состоянию при негативном изменении экономических условий и возникновении опасных событий различного характера [1-4].

Более актуально целесообразно обеспечить организацию чем информационного пространства для совместной работы специалистов административных, проектных, производственных и оперативных служб при эксплуатации и планировании развития технических систем муниципальных образований и предприятий с регламентами аудита в области обеспечения критериев всех единых видов безопасностей (энергетической, экологической, экономической, эпидемиологической и т.д.). Такая цифровая платформа интегрирована существующие региональные должна быть В (территориальные) обеспечению информационные системы способствовать благоприятной жизнедеятельности территориальных образований.

В современных условиях решение задач повышения эффективности региональной энергетической политики целесообразно решать с помощью специализированных информационно-аналитических систем. Информационные данные систем, при своевременном их обновлении, способны обеспечивать оперативное принятие решений по контролю и управлению различными аспектами ЭнБ. В настоящее время не существует действующих информационно-аналитических систем, обеспечивающих полноценную интеграцию всего многообразия факторов ЭнБ регионального уровня, в том числе с присутствием ИТТ, хотя методические подходы к созданию таких систем известны [5-7].

**1.** Иерархические уровни сбора и анализа информационных данных. Перечень источников данных для информационно-аналитического обеспечения функционирования систем по мониторингу, оценке и прогнозированию состояния ЭнБ, включая ГИС и другие информационные системы, определяется с учетом типов данных, необходимых для расчета показателей ее состояния, идентификации и актуализации опасных событий, негативных тенденций, уязвимостей, рисков и угроз, анализа их характеристик, способности оказать влияние на состояние ЭнБ и потенциальные последствия.

В соответствии с пунктом 1 статьи 4 Федерального закона от 03.12.2011 № 382-ФЗ «О государственной информационной системе топливно-энергетического комплекса», функционирует ГИС ТЭК, предназначенная для автоматизации процессов сбора, обработки информации в целях включения в ГИС ТЭК, хранения такой информации, обеспечения доступа к ней, ее предоставления и распространения, повышения эффективности обмена информацией о состоянии и прогнозе развития ТЭК [8].

На федеральном уровне действуют ситуационные центры Президента Российской Федерации, Администрации Президента Российской Федерации, Правительства Российской Федерации, Совета Безопасности Российской Федерации, ряда министерств и ведомств, в том числе Министерства энергетики Российской Федерации [9].

Для обеспечения процесса принятия решений и контроля их выполнения на окружном и региональном уровнях создаются ситуационные центры субъектов Российской Федерации [10-12].

На федеральном и региональном уровнях для координации действий при возникновении или угрозе возникновения опасных событий, нештатных, аварийных и чрезвычайных ситуаций на объектах энергетики функционируют штабы федеральных органов исполнительной власти, в том числе Федеральный штаб Минэнерго России по подготовке к прохождению осенне-зимнего периода, Правительственная комиссия по обеспечению безопасности электроснабжения (федеральный штаб), и органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации [13, 14].

В соответствии с пунктом 37 Доктрины [15], органы государственной власти субъектов Российской Федерации в пределах своей компетенции участвуют с учетом региональных особенностей в обеспечении ЭнБ, обеспечивают осуществление мониторинга состояния ЭнБ на территориях соответствующих субъектов Российской Федерации.

Высокая динамика изменений исходных данных для оценки индикативных показателей ЭнБ во времени делает работу громоздкой, остро встает вопрос не только оперативного доступа к данным для их обработки и анализа, но и наглядного их представления. Создание информационно-аналитической платформы с комплексным инструментальным решением к оценке состояния ЭнБ регионов Российской Федерации, включающим экспертно-аналитический модуль анализа ситуаций и блок технических и управляющих организационных решений, обеспечивающих улучшение показателей состояния ЭнБ и региональной экономики в целом, предполагает цель, направленную на:

- поддержку принятия стратегических решений в области ЭнБ первыми руководителями государства и бизнеса, поддержку принятия решений на региональном уровне;
- формирование многовариантных долгосрочных прогнозов развития ситуации с ЭнБ регионов и страны;
- поддержку разработки стратегий и сценариев развития экономики и бизнеса.

Одной из приоритетных задач такой платформы является оперативное представление информационно-аналитической информации для структур с разными уровнями принятия решений.

Для федеральных органов власти Российской Федерации (Минэнерго, Минстрой, Минэкономразвития, ФАС, аппарат Правительства РФ, Комитет по энергетике Государственной Думы Российской Федерации и др.) необходима информация по ключевым отраслевым показателям ТЭК страны в сфере обеспечения ЭнБ с детализацией на региональном и отраслевом уровне (по субъектам и компаниям).

Для руководителей компаний ТЭК – сравнительная аналитика с блоками рейтингования и сопоставления с другими российскими и международными компаниями по ключевым показателям технологической, производственной, экологической эффективности.

Для руководителей регионов Российской Федерации – доступ к следующим блокам информации:

- место субъекта Российской Федерации в рейтингах субъектов по разным направлениям развития ТЭК, включая показатели объемов добычи/производства и потребления энергоресурсов;
- важнейшие показатели оценки состояния региональной ЭнБ;
- показатели энергоэффективности, экологичности;
- доходы и расходы бюджета и их динамика в сфере ТЭК и теплоснабжения;
- данные по основным компаниям в сфере ТЭК и теплоснабжения субъекта РФ;
- инвестиционные планы компаний ПАО «Россети», ПАО «Газпром» и энергетических компаний по объектам субъекта Российской Федерации;
- балансы энергоресурсов, состояние и перспектива, экологические последствия в целом по субъекту Российской Федерации и по муниципальным образованиям;
- тарифы на электроэнергию, тепло и топливо для населения в целом по субъекту Российской Федерации и по муниципальным образованиям;
- стоимостные балансы в сфере ТЭК и теплоснабжения, состояние и перспектива, бюджетные и социальные (доля в платежах граждан за ЖКУ) последствия – в целом по субъекту Российской Федерации и по муниципальным образованиям;
- показатели готовности к отопительному периоду в целом по субъекту Российской Федерации и по муниципальным образованиям;
- платежи в сфере электро-, газо- и теплоснабжения состояние и прогнозы;
- данные по всем муниципальным образованиям в сфере ТЭК и теплоснабжения состояние и перспектива с тарифными и бюджетными последствиями;

- ситуационная карта с авариями и крупными инцидентами в сфере ТЭК и теплоснабжения субъекта Российской Федерации и их состоянием;
- лента важнейших новостей по вопросам ТЭК в целом, электро-, газо- и теплоснабжения субъекта Российской Федерации:
- изменения в законодательстве по ТЭК в целом, электро-, газо- и теплоснабжению, важные для субъекта Российской Федерации.

Кроме баз данных, региональный блок информационно-аналитической платформы должен содержать экспертно-аналитические характеристики ЭнБ субъекта Российской Федерации для возможности управления ЭнБ и рисками регионального уровня:

- отражать профиль локальных рисков ЭнБ (с географической привязкой и учетом специфических особенностей);
- отражать параметры локальных рисков, выполнять категоризацию масштаба ущербов и вероятности реализации риска для определенного региона;
- осуществлять мониторинг, оценку и прогнозирование изменения региональных ситуаций по состоянию ЭнБ и автономных объектов электрификации;
- визуализировать уровень обеспечения ЭнБ с учетом региональных особенностей, в том числе в развитии энергетики геостратегических территорий, включая Арктическую зону Российской Федерации.

Информационно-аналитическая платформа должна являться эффективным инструментом контроля за планированием и реализацией мер по обеспечению ЭнБ региона.

В статье предлагается вариант разработки регионального блока информационноаналитической платформы мониторинга состояния региональной ЭнБ, включая уровень низового звена — децентрализованного энергетического комплекса электроснабжения (далее — ДЭКЭС) на территории Республики Саха (Якутия).

2. Информационная диаграмма моделируемого комплекса оценки уровня состояния региональной энергетической безопасности. Для построения информационной интегрированной системы использован вариант геоинформационной платформы SakhaGis и PHPMyAdmin, представляющий собой веб-интерфейс, с помощью которого можно администрировать сервер MySQL, запускать команды и просматривать содержимое таблиц и баз данных через браузер. Для формирования баз данных были выбраны следующие информационные ресурсы: карты SakhaGis (карты, спутники), Google (карты, спутники), WRDC (Мировой центр радиационных данных), NASA SEE (спутник), Росреестр, ТороМАР, ESRI (спутник); база субъектов, районов, населённых пунктов Российской Федерации (Toster); базы данных по ТЭК Республики Саха (Якутия).

Обобщенная блок-схема реализации интегрированной информационной системы (далее – ИИС) представлена на рисунке 1. Модуль «Массивы данных 1» содержит в основном таблицы, различные нормативные документы, техническую и технологическую документацию, различные типы карт, позиционирование в пространстве и времени объектов энергетики и их характеристики, состояние объектов энергетики, территориальные кластеры и т.д. Указанная информация поступает в базовый модуль 2.

Базовый модуль 2 — центральный сервер приёма, сортировки и хранения данных по территориям, генерирующим объектам, техническим характеристикам и иных сведений. Данные основаны на расчетных процедурах и наглядном представлении статистических массивов информации. Данные поступают в расчётно-сравнительный модуль 3 или в сопровождающий модуль 5 для дальнейшей обработки.

Расчётно-сравнительный модуль 3 состоит из аналитического и сравнительного блоков.

Расчетный модуль (Аналитический блок) 3 — дает возможность расчета индикативных показателей оценки ЭнБ, на основе мониторинга её состояния. Достаточный объем статистической информации позволяет контролировать динамику ситуации: присутствие отрицательных факторов и высокого сочетания рисков по возникновению угроз отражает скорость ухудшения состояния индикатора.

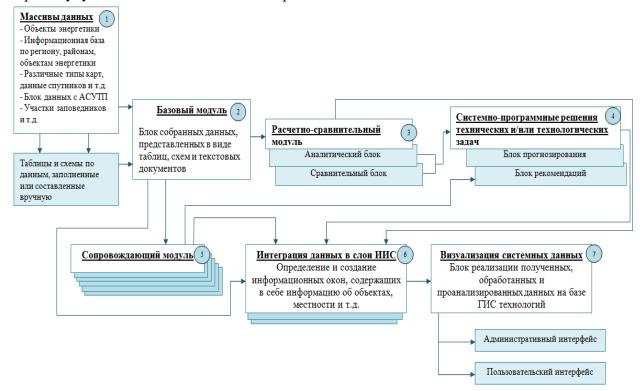


Рис. 1. Блок схема региональной системы мониторинга ЭнБ, включая оценку ЭнБ ДЭКЭС

Сравнительный модуль блока 3 выполняет сравнение результатов расчетов с пороговыми значениями индикаторов для определения уровня ЭнБ. Эта процедура обеспечивает картированную визуализацию уровней ЭнБ; присвоение им индекса уровня ЭнБ (0-1); графическое представление H-распределения уровня ЭнБ.

Сопровождающий модуль 5 является вспомогательным и включает в себя внешние ссылки (на различные внешние базы данных, запросы к моделям гибридных автономных комплексов с участием возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и т.д.) и внутренние ссылки (запрос к различным базам данных и модулям). Необходимые данные из блоков 3, 5 поступают в блок системно-программных решений 4.

Блок системно-программных решений 4 позволяет также выработать рекомендации по решению технических и технологических задач обеспечения ЭнБ ДЭКЭС.

В конечном итоге основная информация представляется в блоке визуализации системных данных 7 с выводом на пользовательский и административный интерфейсы.

Доступ пользователей к работе в системе с различными блоками организован в соответствии с разграничением прав допуска, который осуществляется обращением к администратору системы. Для системы определены уровни категорий пользователей:

- 1. Заинтересованные лица, частные компании. Эта группа пользователей получает доступ к информации общего характера.
- 2. Государственные и отраслевые структуры имеют доступ к информации по своей отрасли и направлению деятельности. Эта группа пользователей имеет право вносить данные текущего состояния индикаторов ЭнБ только в зоне своей ответственности. Для доступа в другой блок по иной отраслевой структуре понадобится запрос на доступ.

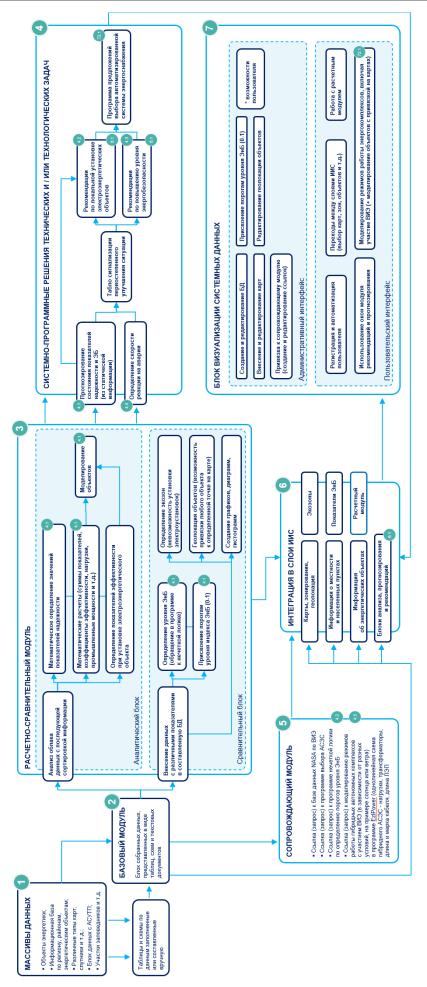
3. Научно-исследовательским структурам доступна вся информация, они могут запрашивать доступ к базам данных, которые внесла 2 группа. Работа в системе этой группы фиксируется и позволяет ведомственным структурам видеть и иметь информацию о тех, кто занимается вопросами в направлении их деятельности. Такая модель позволяет иметь возможность совместной деятельности с конкретными пользователями.

Представленная структура доступа к системе позволяет связать в единое пространство все указанные категории пользователей, что позволяет повышать эффективность мероприятий, направленных на укрепление энергетической безопасности.

**Мониторинг состояния энергетической безопасности** ДЭКЭС осуществляется по разработанному алгоритму. Структура алгоритма содержит несколько модулей:

- 1. Базовый модуль данные по территориям, генерирующим объектам, техническим характеристикам и иным данным; включает в себя подразделы: общий информационный кластер, информационный энергетический кластер ДЭКЭС, ценологический анализ [16], базы данных по расчету значений групп индикаторов. Данные основаны на расчетных процедурах и статистических массивах информации.
- 2. Модуль эко-зоны включает в себя информационное поле на интерактивной карте с тематической маркировкой по заповедникам, другим экологически-ресурсным зонам, объектам технического кластера и территориям жизнедеятельности коренных малочисленных народов севера. В модуле выполняется районирование по экологической составляющей ЭнБ в виде карт-схем с тематическими слоями (наложением всех влияющих факторов) и выделением зоны по наиболее остро проявляющимся ситуациям, угрожающим и нарушающим экологический «иммунитет» территории.
- 3. Модуль потенциала ВИЭ [17]. Включает в себя атрибутивные данные, кластерный анализ данных по солнечному потенциалу; кластерный анализ данных по ветровому потенциалу; кластерный анализ данных по биоэнергетическому потенциалу; кластерный анализ данных по гидравлическому потенциалу; визуализация данных потенциалов; индикаторы привлекательности ВИЭ в ЭнБ; блок оптимизации автономных систем электроснабжения с участием ВИЭ.
- 4. Модуль ЭнБ представляет собой интерактивную среду (карты) с тематическими маркировками и выбором различных типов карт, а также имеет наглядное представление показателей ЭнБ на картах. Этот модуль имеет взаимосвязь с остальными модулями, что дает возможность ввода текущих данных для расчета индикативных показателей. Достаточный объем статистической информации позволяет фиксировать изменения в ситуации: присутствие отрицательных факторов и высокого сочетания рисков по возникновению угроз отражает динамика ухудшения состояния индикатора. Сравнительный модуль результатов расчетов с пороговыми значениями индикаторов энергетической безопасности позволяет классифицировать её уровень.

Интегрированная информационная система поддерживает единый репозиторий, выполняющий функции создания, ведения и предоставления пространственных данных, необходимых для анализа и оценки показателей, получения многофакторной информации о территории с геолокацией энергетических объектов и населённых пунктов, мониторинга уровня ЭнБ объектов и возможности ВИЭ в уязвимых кластерах ее состояния с географической привязкой.

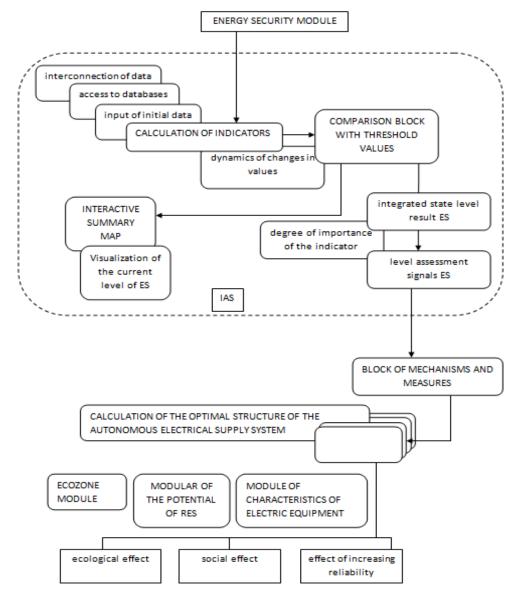


**Рис. 2.** Развернутая схема функционирования региональной информационно-интегрированной системы мониторинга ЭнБ

Информационная система разработана в виде веб-сайта, что является весьма удобным, поскольку предоставляется дистанционный доступ к ее инструментам в любое время, а простой и понятный интерфейс не требует дополнительного программного обеспечения и специальных знаний для осуществления необходимых расчетов. В качестве языков программирования использованы HTML и CSS для создания интерфейса и содержимого модулей системы, JavaScript позволил реализовать механизмы расчетов значений индикаторов и выполнения сравнительного анализа с пороговыми уровнями.

Алгоритм расчета (рисунок 3) индикативных показателей энергетической безопасности реализует взаимосвязь между отдельными блоками, с целью достижения обоснованности и оперативности принимаемых решений.

Расчет индикативных показателей осуществляется по заданному инструментарию. Возможность ввода исходных данных и взаимосвязь с массивами данных базового модуля позволяет оценить динамику поведения индикатора ЭнБ и устанавливать причины нарушения безопасного состояния. Анализ динамических рядов индикаторов позволяет судить о том, с какой скоростью осуществляются процессы улучшения или ухудшения ситуации по ЭнБ во времени.



**Рис. 3.** Алгоритм информационной системы (IAS) оценки уровня ЭнБ

Информационная система позволяет осуществить анализ облака данных с определением значений индикативных показателей ЭнБ (рисунок 4) с последующей сортировкой и визуализацией информации — созданием графиков, диаграмм, гистограмм.

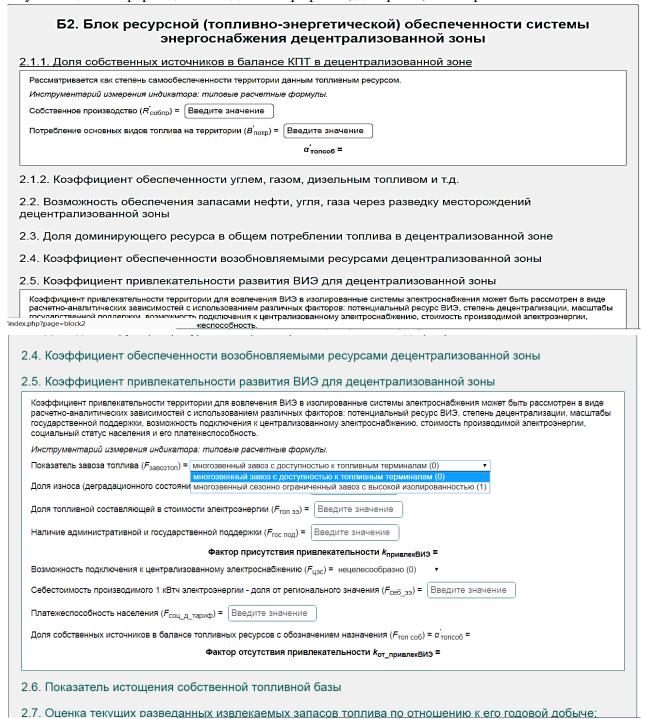
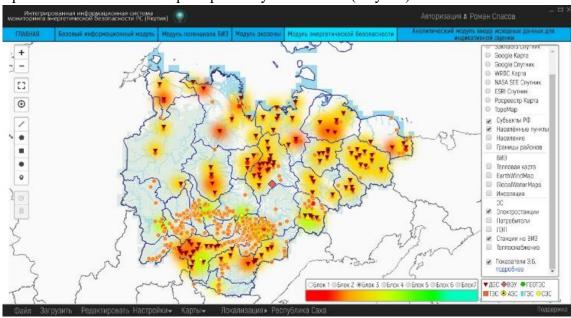


Рис. 4. Скриншот окна расчета индикаторов оценки ЭнБ исследуемого уровня

При этом анализ укрупненных групп важнейших показателей, рассчитанных на исходных данных определенного периода наблюдения, позволяет выделить слабые позиции в состоянии ЭнБ каждого субъекта Российской Федерации. При выделении указанных позиций в оценке состояния ЭнБ субъектов Российской Федерации использованы наименования пороговых значений: чрезвычайное состояние — необходимость оперативного инициирования деятельности в направлениях обеспечения ЭнБ с недостаточностью мер, принятие стратегических решений в области обеспечения ЭнБ; депрессивное состояние —

необходимость пересмотра действующих мер и усиление контроля за их реализацией, а также корректировки управленческих решений в области обеспечения ЭнБ.

На мониторе появляется градиентная полоса, цвет которой будет обозначать степень состояния ЭнБ децентрализованной зоны. Чрезвычайное состояние интерпретируется красным цветом. Градиент от оранжевого до жёлтого обозначает депрессивное состояние с соответствующим процентом. Цвет от зелёного до бирюзового показывает условно безопасное состояние определённых блоков ЭнБ. На рисунке 5 приведён вид экрана монитора с иллюстрацией состояния ЭнБ в области надежности топливо- и энергоснабжения децентрализованной зоны на примере Республики Саха (Якутия).



**Рис. 5.** Блок состояния ЭнБ в области надежности топливо- и энергоснабжения децентрализованной зоны

Заключение. Предлагаемая информационная система является эффективным и удобным инструментом, который позволяет оперативно представить результаты пользователям и дает возможность самостоятельно производить вычисление показателей ЭнБ с выбором оптимального варианта построения децентрализованного энергетического комплекса. Помимо явного удобства пользования системой, её архитектура позволяет перейти к моделированию различных ситуаций и форм визуализации индикативных показателей ЭнБ территории или объекта в результате последствий аварийных ситуаций, изменения структуры автономных систем электроснабжения, например, введением ВИЭ и т.д.

Сочетание выбранных модулей в разработанной системе мониторинга состояния энергетической безопасности удаленных и изолированных территорий позволяет осуществлять систематический контроль ее уровня. Итоговым этапом функционирования информационно-аналитической системы является определение рациональных и эффективных, с точки зрения укрепления ЭнБ, мероприятий. Дополнительные меры по ее обеспечению через сочетание традиционных энергоресурсов и доступных источников возобновляемой энергии основаны на определении наиболее эффективных путей с разных точек зрения (достижение наиболее экономического решения, технологического совершенства, социального эффекта, целей экологической политики и т.д.). На основе визуализации «уязвимых» и слабых позиций и аналитической обработки оперативной информации появляется возможность повысить качество принимаемых стратегических решений в области ЭнБ.

Исследуемые энергозоны со свойственными специфическими особенностями существования не имеют должной способности «сопротивляться» воздействиям угроз ЭнБ,

например, природного или территориального характера. Поэтому модуль сигнализации системы об уровне состояния ЭнБ позволяет оценить степень кризисности ситуации и предложить переход к одному из видов механизмов воздействия по ее улучшению. Оперативный мониторинг сопровождается определением предполагаемых отдельных эффектов для предложенного комплекса мероприятий.

Разработанная информационная система позволяет, в интегрированной среде оценки уровня ЭнБ, выполнять расчеты текущих показателей индикаторов ЭнБ с учетом специфики децентрализованных территорий Севера и Арктических зон. Методика оценки слабых и уязвимых мест ЭнБ обеспечивает определение приоритетных территорий с жесткими требованиями по обеспечению комфортных условий жизнедеятельности потребителей электроэнергии.

Модель и инструментарий диагностики децентрализованных территорий исследуемых климатических кластеров могут быть использованы как на существующих децентрализованных объектах и территориях, так и на прединвестиционной стадии цикла мероприятий по повышению уровня ЭнБ.

#### Список источников

- 1. Lukutin B., Kiushkina V. Energy security of northern and arctic isolated territories. E3S Web of Conferences, 2019, vol. 77, p. 01008, DOI: 10.1051/e3sconf/20197701008.
- 2. Kiushkina V., Antonenkov D. Specifics of assessing energy security of isolated energy service areas in territories with harsh climatic conditions. International journal of energy technology and policy, 2019, vol. 15, no. 2/3, pp. 236–253.
- 3. Lukutin B., Kiushkina V. Matrix of vulnerability of decentralized areas to local energy security risks in the northern and arctic zones in the structural set of solutions. E3S Web of Conferences, 2020, vol. 209, p. 06012, DOI: 10.1051/e3sconf/202020906012.
- 4. Лукутин Б.В. Характеристики энергетической безопасности децентрализованного района и автономного объекта электрификации / Б.В. Лукутин, В.Р. Киушкина // Вестник ИРГТУ, 2021. № 25(1). С. 66-79.
- 5. Сендеров С.М. Методика мониторинга состояния энергетической безопасности России на региональном уровне / С.М. Сендеров, Н.И. Пяткова, В.И. Рабчук, и др.— Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2014. 146 с.
- 6. Lukutin B., Kiushkina V. Intellectual energy security monitoring of decentralized systems of electricity with renewable energy sources. E3S Web of Conferences, 2018, vol. 69, p. 02002, DOI: 10.1051/e3sconf/20186902002
- 7. Быкова Е.В. Вычислительный комплекс для мониторинга и анализа энергетической безопасности / Е.В. Быкова, В.М. Постолатий, и др. // Международная конференция «Energy of Moldova 2012. Regional aspects of development». Кишинев, Республика Молдова, 4–6 октября 2012 г. С. 63-69.
- 8. Федеральный закон от 03.12.2011 № 382-ФЗ «О государственной информационной системе топливноэнергетического комплекса».
- 9. Ситуационные центры и центры управления для органов государственной власти. URL: https://solutions.polymedia.ru/gov?ysclid=mcrjiz61pu619815717 (дата обращения: 17.03.2025)
- 10. Информационно-аналитическая система Ситуационный центр главы субъекта. URL: https://atsiberia.ru/situacionnyj\_centr\_glavy\_subekta (дата обращения: 12.01.2025)
- 11. Ситуационный центр социально-экономического развития регионов Российской Федерации. URL: https://regstat2.rea.ru (дата обращения: 15.06.2025)
- 12. Информационно-аналитическая система Ситуационный центр Главы Республики Caxa (Якутия URL: https://src-sakha.ru/docs/ias-sc?ysclid=mcrk74nhx7446580912 (дата обращения: 10.06.2025)
- 13. Постановление Правительства Российской Федерации от 16 февраля 2008 г. № 86 "О штабах по обеспечению безопасности электроснабжения" (с изменениями и дополнениями от 10.09.2024).
- 14. Плиско С.А. Энергетическая безопасность субъектов РФ как залог реализации энергетической стратегии России до 2030 года // Проблемный анализ и государственно-управленческое проектирование, 2011. Вып. 4. С. 138-143.
- 15. Указ Президента Российской Федерации от 13.05.2019 г. № 216 Об утверждении Доктрины энергетической безопасности Российской Федерации
- 16. Kiushkina V., Antonenkov D. Rang analysis of distributed electricity consumers of decentralized energy zones of the north and arctic regions of the Russian federation. 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602483.

17. Лукутин Б.В. Влияние возобновляемой энергетики на энергетическую безопасность децентрализованных систем электроснабжения / Б.В. Лукутин, В.Р. Киушкина // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии, 2020. – Т. 13. – № 5. – С. 632-642.

Киушкина Виолетта Рафиковна. Доцент, доктор технических наук, Российское энергетическое агентство Минэнерго России, руководитель Департамента энергетической безопасности и инфраструктуры ТЭК, Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина, профессор кафедры безопасности цифровой экономики и управления рисками. Основные направления исследований: энергетическая безопасность, надежность энергетических систем, управление рисками, децентрализованное электроснабжение, возобновляемая энергетика, малая энергетика Севера. AuthorID (РИНЦ): 597361, SPIN: 5146-2083, ORCID: 0000-0002-7791-1844, Kiushkina@rosenergo.gov.ru. г. Москва, улица 8 Марта 12.

Лукутин Борис Владимирович. Профессор, доктор технических наук, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, профессор отделения Энергетики и электротехники Инженерной школы энергетики. Основные направления исследований: энергетическая безопасность, надежность энергетических систем, децентрализованные системы электроснабжения, возобновляемая энергетика. AuthorID (РИНЦ):113093, SPIN: 5558-7038, ORCID:0000-0002-2049-6635, Lukutin48@mail.ru. г. Томск, улица Усова 7.

UDC 338.45:620.9(470)

DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.009

# Information system for supporting management decisions in the field of energy security of decentralized energy districts

### Violetta R. Kiushkina<sup>1</sup>, Boris V. Lukutin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Russian energy agency of the ministry of energy of Russia, Gubkin Russian state university of oil and gas, Russia, Moscow, *Kiushkina@rosenergo.gov.ru* 

<sup>2</sup>National research Tomsk polytechnic university, Russia, Tomsk

Abstract. An information system is proposed that allows for the prompt presentation of numerical results of ENB indicators with the selection of the optimal option for building a decentralized energy complex. The system's architecture enables the simulation of various situations and the visualization of indicative indicators of ENB for a territory or facility, such as the consequences of emergencies, changes in the structure of autonomous power supply systems, including the introduction of renewable energy sources, etc. The combination of selected modules in the developed system for monitoring the energy security of remote and isolated territories allows for the systematic monitoring of its level. The final stage of the information and analytical system's functioning is the determination of rational and effective measures for strengthening energy security. The studied energy zones, with their specific characteristics, do not have the necessary ability to "resist" the effects of natural or territorial energy security threats. Therefore, the system's alarm module for the level of the ENB state allows us to assess the degree of the crisis situation and suggest a transition to one of the types of mechanisms for improving it. Operational monitoring is accompanied by the determination of the expected individual results for the proposed set of measures. The developed information and analytical system allows us to assess the level of the ENB in an integrated environment and calculate the current indicators of the ENB, taking into account the specifics of the decentralized territories of the North and the Arctic zones. The algorithm for identifying and assessing the weak and vulnerable points of the ENB ensures the identification of priority areas with strict requirements for ensuring comfortable living conditions for electricity consumers. The model and diagnostic tools for decentralized areas can be used both on existing decentralized facilities and territories, and at the pre-investment stage of energy security improvement measures.

**Keywords:** information system, structure, algorithm, analytical module, monitoring, energy security, local energy, decentralized power supply

#### References

- 1. Lukutin B., Kiushkina V. Energy security of northern and arctic isolated territories. E3S Web of Conferences, 2019, vol. 77, p. 01008, DOI: 10.1051/e3sconf/20197701008.
- 2. Kiushkina V., Antonenkov D. Specifics of assessing energy security of isolated energy service areas in territories with harsh climatic conditions. International journal of energy technology and policy, 2019, vol. 15, no. 2/3, pp. 236–253.
- 3. Lukutin B., Kiushkina V. Matrix of vulnerability of decentralized areas to local energy security risks in the northern and arctic zones in the structural set of solutions. E3S Web of Conferences, 2020, vol. 209, p. 06012, DOI: 10.1051/e3sconf/202020906012.
- 4. Lukutin B.V., Kiushkina V.R. Kharakteristiki energeticheskoy bezopasnosti detsentralizovannogo rayona i avtonomnogo ob"ekta elektrifikatsii [Characteristics of energy security of a decentralized region and an autonomous electrification facility]. Vestnik IRGTU [Bulletin of Irkutsk State Technical University], 2021, no. 25(1), pp. 66-79.
- 5. Senderov S.M., Pyatkova N.I., Rabchuk V.I., et al. Metodika monitoringa sostoyaniya energeticheskoy bezopasnosti Rossii na regional'nom urovne [Methodology for monitoring the state of energy security in Russia at the regional level]. Irkutsk, ISEM SO RAN [Melentiev energy systems institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences] Publ., 2014, 146 p.
- 6. Lukutin B., Kiushkina V. Intellectual energy security monitoring of decentralized systems of electricity with renewable energy sources. E3S Web of Conferences, 2018, vol. 69, p. 02002, DOI: 10.1051/e3sconf/20186902002.
- 7. Bykova E.V., Postolaty V.M., Chinik M.A., et al. Vychislitel'nyy kompleks dlya monitoringa i analiza energeticheskoy bezopasnosti [Computational complex for monitoring and analyzing energy security]. International conference "Energy of Moldova 2012. Regional aspects of development". Chisinau, Republic of Moldova, October 4-6, 2012, pp. 63-69.
- 8. Federal'nyy zakon ot 03.12.2011 № 382-FZ "O gosudarstvennoy informatsionnoy sisteme toplivno-energeticheskogo kompleksa" [Federal Law No. 382-FZ of December 3, 2011 "On the State Information System of the Fuel and Energy Complex"].
- 9. Situatsionnye tsentry i tsentry upravleniya dlya organov gosudarstvennoy vlasti [Situation centers and control centers for public authorities], available at: https://solutions.polymedia.ru/gov (accessed: 03/17/2025).
- 10. Informatsionno-analiticheskaya sistema "Situatsionnyy tsentr glavy sub"ekta" [Information and analytical system "Situation Center of the Head of the Subject"], available at: https://atsiberia.ru/situacionnyj\_centr\_glavy\_subekta (accessed: 01/12/2025).
- 11. Situatsionnyy tsentr sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya regionov Rossiyskoy Federatsii [Situation Center for Socio-Economic Development of the Regions of the Russian Federation], available at: https://regstat2.rea.ru (accessed: 06/15/2025).
- 12. Informatsionno-analiticheskaya sistema "Situatsionnyy tsentr Glavy Respubliki Sakha (Yakutiya)" [Information and analytical system "Situation Center of the Head of the Republic of Sakha (Yakutia)"], available at: https://src-sakha.ru/docs/ias-sc (accessed: 06/10/2025).
- 13. Postanovlenie Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 16 fevralya 2008 g. № 86 «O shtabakh po obespecheniyu bezopasnosti elektrosnabzheniya» (s izmeneniyami i dopolneniyami ot 10.09.2024) [Decree of the Government of the Russian Federation of February 16, 2008 No. 86 "On Headquarters for Ensuring Power Supply Security" (as amended on September 10, 2024)].
- 14. Plisko S.A. Energeticheskaya bezopasnost' sub"ektov RF kak zalog realizatsii energeticheskoy strategii Rossii do 2030 goda [Energy security of the constituent entities of the Russian Federation as a guarantee of the implementation of the Energy Strategy of Russia until 2030]. Problemnyy analiz i gosudarstvennoupravlencheskoe proektirovanie [Problem Analysis and Public Administration Projection], 2011, no. 4, pp. 138-143.
- 15. Ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii ot 13.05.2019 no. 216 "Ob utverzhdenii Doktriny energeticheskoy bezopasnosti Rossiyskoy Federatsii" [Decree of the President of the Russian Federation of May 13, 2019 No. 216 "On Approval of the Energy Security Doctrine of the Russian Federation"].
- 16. Kiushkina V., Antonenkov D. Rang analysis of distributed electricity consumers of decentralized energy zones of the north and arctic regions of the Russian federation. 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602483.
- 17. Lukutin B.V., Kiushkina V.R. Vliyanie vozobnovlyaemoy energetiki na energeticheskuyu bezopasnost' detsentralizovannykh sistem elektrosnabzheniya [The influence of renewable energy on the energy security of decentralized power supply systems]. Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii [Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies], 2020, vol. 13, no. 5, pp. 632-642.

Violetta Rafikovna Kiushkina. Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, Russian Energy Agency of the Ministry of Energy of Russia, Head of the Department of Energy Security and Fuel and Energy Complex Infrastructure, Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Professor of the Department of Digital Economy Security and Risk Management. Main areas of research: energy security, reliability of energy systems, risk management, decentralized power supply, renewable energy, small-scale energy of the North. AuthorID (RSCI): 597361, SPIN: 5146-2083, ORCID: 0000-0002-7791-1844, Kiushkina@rosenergo.gov.ru. Moscow, 8 Marta Street 12.

Boris Vladimirovich Lukutin. Professor, Doctor of Technical Sciences, National Research Tomsk Polytechnic University, Professor of the Department of Energy and Electrical Engineering at the Energy Engineering Schooly. Main research areas: energy security, reliability of energy systems, decentralized power supply systems, renewable energy. AuthorID (RSCI):113093, SPIN: 5558-7038, ORCID:0000-0002-2049-6635, Lukutin48@mail.ru. Tomsk, Usova Street 7.

Статья поступила в редакцию 20.07.2025; одобрена после рецензирования 29.09.2025; принята к публикации 19.10.2025.

The article was submitted 07/20/2025; approved after reviewing 09/29/2025; accepted for publication 10/19/2025.

УДК 004.8:620.9

DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.010

# Особенности исследования влияния угроз энергетической безопасности на надежность энергоснабжения потребителей в современных условиях

### Пяткова Наталья Ивановна, Мамедов Тимур Габилович

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Россия, Иркутск, *nata@isem.irk.ru* 

Аннотация. Надежность энергоснабжения потребителей — важнейшая составляющая энергетической безопасности (ЭБ). Недопоставки энергоресурсов, их срывы приводят к негативным последствиям у потребителей энергоресурсов с значительными экономическими ущербами, это повышает актуальность исследований обеспечения надежности энергоснабжения. Учет изменяющихся условий функционирования и развития энергетики под влиянием внешних и внутренних факторов требует значительных усовершенствований в модельно-инструментальных средствах, которые могут применяться для исследований по оценке надежности энергоснабжения потребителей в условиях возможных нештатных ситуаций. В статье представлен краткий анализ ситуации на мировых энергетических рынках и в России, приведена схема модификации разработанной экономикоматематической модели, приведена схема работы с моделью и тестовый пример.

**Ключевые слова:** энергетическая безопасность, надежность энергоснабжения, угрозы энергетической безопасности, экономико-математическая модель

**Цитирование.** Пяткова Н.И. Особенности исследования влияния угроз на надежность энергоснабжения в современных условиях / Н.И. Пяткова, Т.Г. Мамедов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. — № 4(40). — С. 128-137. — DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.010.

**Введение.** Надежность энергоснабжения потребителей является одной из важнейших задач обеспечения энергетической безопасности (ЭБ). Недопоставки энергоресурсов, их срывы приводят к негативным последствиям у потребителей энергоресурсов с значительными экономическими ущербами.

Одним из важнейших требований ЭБ страны является бесперебойное топливо- и энергоснабжение внутренних потребителей топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), как в условиях штатного функционирования систем энергетики, так и в условиях реализации нештатных ситуаций в энергетике [1]. Основное влияние на выполнение этого требования оказывают угрозы и негативные факторы [2]. Эти угрозы были классифицированы на следующие группы: экономические, социально-политические, внешнеэкономические, техногенные, природные и военно-политические [3, 4]. Кроме того, были сформированы стратегические угрозы, реализация которых может вызвать значительный ущерб в экономике страны в перспективе. С течением времени и изменениями на внешних энергетических рынках эти угрозы могут трансформироваться, их приоритетность и значимость для функционирования энергетики и экономики страны изменяется [5, 6].

С 2022 года резко изменилась ситуация на мировых энергетических рынках под воздействием санкций и различного рода ограничений на экспорт российских энергоресурсов и товаров. Под влиянием этих негативных факторов меняется приоритетность угроз надежному энергоснабжению, а значимость отдельных угроз усиливается.

**Характеристика изменений в ТЭК России в современных условиях.** Анализ современного состояния мировых энергетических рынков за последние три года показывает неблагоприятное положение дел с экспортом российских энергоресурсов:

- I. Ограничение экспорта:
  - а) природного газа (рис. 1);

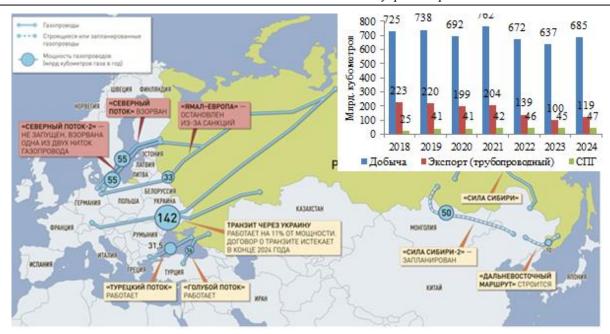
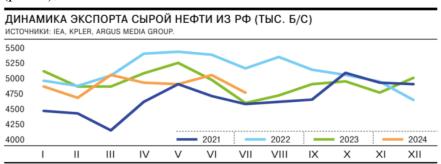


Рис. 1. Добыча, экспорт газа в 2018-2024 гг. [7, 8]

### б) нефти (рис. 2);



**Рис. 2.** Динамика экспорта нефти в 2021-2024 гг. [9]

# в) угля (рис.3,4). **добыча и экспорт Российского угля, млн тонн**Источник: Росстат, Минэнерго

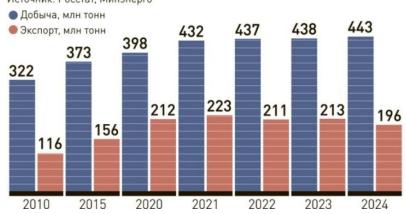


Рис. 3. Добыча и экспорт российского угля в 2010-2024 гг. [10]

В 2021 году российские угольные компании отправили на экспорт 216 млн тонн угля, из которых 125 млн тонн ушло на рынки АТР, 50 млн тонн – в Европу, 17 млн тонн – в СНГ, 6 млн тонн – в Северную Америку. В августе 2022 года вступило в силу европейское эмбарго на российский уголь. Существенно сократили/отказались от закупок угля из России полностью ряд стран АТР – Япония, Южная Корея, Тайвань, что создало риск недопоставок на внешние рынки еще для примерно 55 млн тонн в год.

Добыча угля в России по итогам 2023 года составила 438 млн тонн, экспорт достиг примерно около 200 млн тонн. В 2024 году добычу и экспорт сохраняется на уровне 440 млн тонн и 210–220 млн тонн соответственно (рис. 3).

Экспортерам удалось нарастить поставки в азиатские страны, в том числе за счет скидок, которые они предоставляли покупателям. В результате российские угольные компании заняли нишу на рынках АТР и являются конкурентоспособными поставщиками (рис. 4).

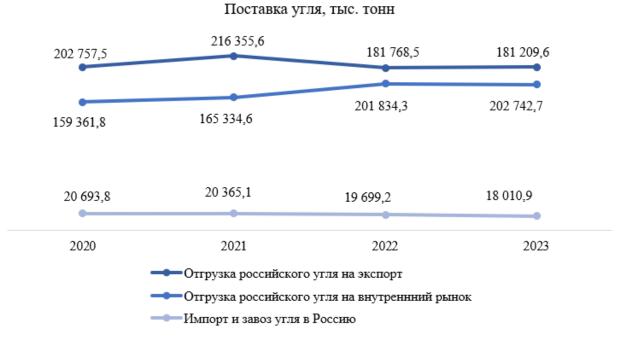
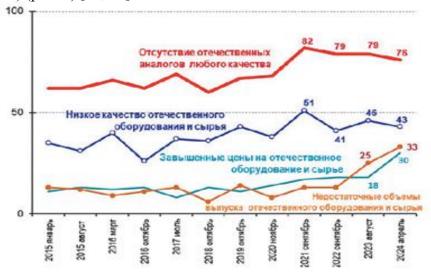


Рис. 4. Поставка угля на экспорт, внутренний рынок, импорт угля в 2020-2023 гг. [11]

В 2024 году угольные компании работали в условиях низких экспортных цен и высоких логистических затрат, что негативно сказалось на их работе. Удаленные от восточных портов угольщики Кузбасса сократили добычу в этом году на 5,6%, до 118,3 млн тонн. Отгрузка угля в июле сократилась на 12,5%, до 13,9 млн тонн [11].

II. Значительные трудности по импортозамещению для российских промышленных предприятий электроэнергетики, транспорта нефти и газа (долговременное воздействие) (рис. 5) [12, 13].



**Рис. 5.** Барьеры реализации импортозамещения для российских промышленных предприятий,% [13]

Электроэнергетика страны примерно на 80% зависима от импорта газовых турбин и компонентов к ним. Что касается паровых и гидравлических турбин, котлов, то доля западных компаний на энергетическом рынке РФ составляла около 30%. Электростанции на этом оборудовании вырабатывают около 70% электроэнергии страны, требуется поддержание его в рабочем состоянии. Снятия санкций в ближайшей перспективе не ожидается, поэтому, наряду с запуском программ импортозамещения, необходимо решать вопросы замены поставщиков оборудования.

Сохраняется тенденция недофинансирования отрасли и роста устаревшего парка оборудования. Эксперты оценивают износ оборудования и коммуникаций 60-70%. Создаются предпосылки к техногенным авариям. Препятствием к модернизации инженерных систем и комплексов является недостаток инвестиций.

III. Интенсификация ввода объектов возобновляемых источников энергии в европейских странах.

Сформировавшиеся за последние три года негативные тенденции на мировых энергетических рынках трансформируют стратегические угрозы энергетической безопасности, меняют их приоритетность и усиливают значимость некоторых угроз:

усиление угрозы недостатка инвестиций в развитие энергетических отраслей – это происходит за счет снижения доли нефтегазовых доходов в бюджете страны (рис. 6). В 2023г. нефтегазовые доходы уменьшились в 2 раза по сравнению с 2022 годом. Незначительно увеличилась эта доля в 2024 году за счет роста цен на нефть;



Рис. 6. Нефтегазовые доходы бюджета [14]

- задержку освоения и ввода в эксплуатацию новых нефтяных и газовых месторождений;
- затруднения по импортозамещению оборудования на объектах энергетики;
- увеличение сложностей в изменениях экспортных направлений энергоресурсов;
- негативная волатильность цен на уголь и влияние на спрос на уголь.

Модификация модели и программного комплекса ИНТЭК-А с учетом новых вызовов. Учет изменений в энергетических отраслях под влиянием внешних и внутренних факторов требует значительных усовершенствований в модельно-инструментальных средствах, которые могут применяться для исследований по оценке надежности энергоснабжения потребителей в условиях возможных нештатных ситуаций.

Для проведения подобных исследований модифицированы экономико-математическая модель развития и функционирования ТЭК с учетом требований ЭБ [15] и программный комплекс (ПК) ИНТЭК-А [16].

В модели представлены следующие уровни иерархии:

 технологический уровень — состоит из энергетических отраслей: газовой, угольной, нефтеперерабатывающей промышленностей, электро- и теплоэнергетической отрасли, а также отдельно выделен потребительский блок, в котором представлены внутренние и экспортные потребители;

- территориальный уровень представлен федеральными округами страны;
- временной уровень модели описывает функционирование энергетики в годовом режиме, развитие энергетики по периодам в 5 лет до 2035 г.

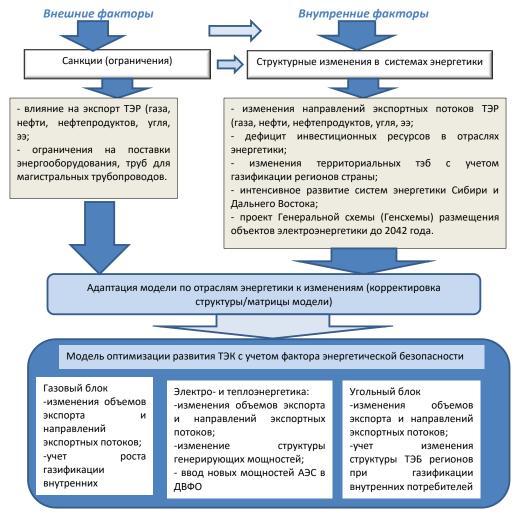
Результатом решения с использованием описанной модели являются: 1) оценка последствий возможных нештатных ситуаций в системах энергетики и ТЭК в виде дефицита энергоресурсов у потребителей, выявление «узких» мест в системах; 2) оценка вариантов развития отраслевых систем и ТЭК в целом с учетом соответствия требованиям надежности энергоснабжения.

Для формирования модели и возможных нештатных ситуаций используются:

- технико-экономические показатели работы электростанций, расходы топлива (газа, мазута, угля), электро- и тепло- энергии, отчетные данные по производству и потреблению промышленной продукции, отчетные данные Госкомстата;
- характеристики возможных угроз, которые могут реализоваться в виде нештатных ситуаций в отраслях ТЭК и СЭ [15].

Используя данные характеристики и показатели, формируются исходные условия для экспериментальных расчетов, которые проводятся с использованием модели оптимизации развития ТЭК с учетом фактора энергетической безопасности для оценки влияния той или иной угрозы на надежность энергоснабжения потребителей.

Разрабатываемый вариант модели учитывает следующие изменения (рис. 7):



**Рис. 7.** Схема трансформации модели оптимизации развития ТЭК с учетом фактора энергетической безопасности

- переориентация экспорта топливно-энергетических ресурсов (газа, нефти, нефтепродуктов, угля, электроэнергии);
- учет интенсивной газификации регионов страны через модификацию блока потребителей;
- интенсивное развитие систем энергетики Сибири и Дальнего Востока;
- блок электро- и теплоэнергетики дополняется и модифицируется с учетом доработанного проекта Генеральной схемы (Генсхемы) размещения объектов электроэнергетики до 2042 года;
- введение инвестиционных составляющих в явном виде (дополнительных уравнений и переменных, описывающих удельные капвложения по всем технологическим этапам) это затраты на реконструкцию, модернизацию действующих мощностей, затраты на вывод устаревшего оборудования, затраты на ввод новых мощностей предприятий.

Исследования по оценке реализации угроз проводятся на обновленном ПК ИНТЭК-А [16]. Веб-версия ПК ИНТЭК-А (ПК ИНТЭК-SAW) — это новая версия ПК, которая может использоваться для проведения исследований развития ТЭК в различных аспектах в on-line режиме. Расчёты выполняются при помощи решателя линейных оптимизационных моделей. ПК позволяет моделировать технологические и территориальные связи ТЭК, реализации угроз развитию ТЭК и мероприятия по недопущению или ликвидации последствий реализации угроз развития ТЭК. Последовательность работы с моделью и ПК ИНТЭК-SAW осуществляется по определенной схеме (рис.8).



**Рис. 8.** Блок-схема последовательности работы с моделью и ПК ИНТЭК-SAW

Для проверки адекватности и корректности, проводимых программных и модельных усовершенствований (корректировок) проведен тестовый экспериментальный расчет по оценке влияния снижения генерации ГЭС Сибири на надежное энергоснабжение потребителей.

Оценка влияния снижения генерации сибирских ГЭС на надежность снабжения потребителей с помощью модифицированных модели и ПК «ИНТЭК-SAW». В последнее время в Сибири, на Дальнем Востоке и южных районах России наблюдается рост

потребления электроэнергии и ее дефицит, связанный, в частности, с увеличением потребности в электроэнергии Центров обработки данных (майнингом) [17]. Поэтому для тестирования модели и модифицированного ПК ИНТЭК-SAW проведены экспериментальные расчеты по возможному снижению генерации ГЭС в Сибирском ФО и оценке возможных дефицитов.

При этом ставились следующие задачи:

- проверка адекватности модели и корректного описания моделируемых систем энергетики, соответствие технико-экономических показателей модели исходной информации;
- тестирование ПК ИНТЭК-SAW на достоверность получаемых результатов, отладка средств (табличных, графических) для проведения анализа получаемых результатов, их визуализация.

Анализ расчетов по сформированной ситуации со снижением генерации на ГЭС Сибирского федерального округа показал, что разработанная версия модели нуждается в корректировке блока электроэнергетики в части взаимосогласованной работы различных типов электростанций с учетом диверсификации их работы при ограничениях, вызванных реализацией возможных угроз.

Формальная оценка ситуации со снабжением электроэнергией потребителей показала, что возможное снижение выработки электроэнергии на ГЭС Сибирского ФО вызвала дефицит в отдельных регионах страны (рис. 9): Приволжском -1,5%, Южном -2,5%, Уральском -1,2%, Сибирском -19,5%.

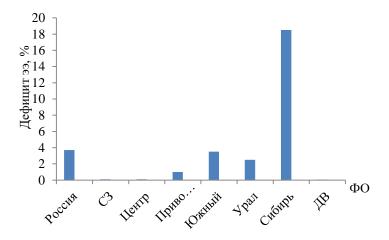


Рис. 9. Дефицит электроэнергии, в % от потребности

Анализ полученных результатов на версии модели показал дальнейшее направление по модификации модели, корректировке блока электро- и теплоэнергетики на основе статистических данных Госкомстата и разработанного проекта Генеральной схемы (Генсхемы) размещения объектов электроэнергетики до 2042 года.

Заключение. В статье выполнен анализ негативных тенденций текущей ситуации в энергетике России, влияющих на угрозы энергетической безопасности и их трансформацию. Приведена схема модификации существующей версии модели для исследований проблем энергетической безопасности с учетом влияния внешних и внутренних факторов изменения рынков энергоресурсов.

Новая версия модели учитывает следующие изменения:

направления экспортных потоков топливно-энергетических ресурсов (газ, нефть, нефтепродукты, уголь, электроэнергия);

- влияние учета газификации регионов страны на изменение структуры территориальных топливно-энергетических балансов;
- интенсивное развитие энергосистем Сибири и Дальнего Востока;
- блок электро- и теплоэнергетики дополнен и изменен с учетом доработанного проекта Генеральной схемы (Генеральной схемы) размещения объектов электроэнергетики до 2042 года;
- введение инвестиционных составляющих в явном виде (дополнительных уравнений и переменных, описывающих удельные капвложения по всем технологическим этапам)

С учетом этих изменений проведен тестовый экспериментальный расчет для проверки адекватности модели и корректности описания моделируемых энергосистем, соответствия технико-экономических показателей модели исходной информации.

Вычислительные эксперименты проведены на новой версии ПК ИНТЭК-SAW с целью тестирования: на достоверность полученных результатов, для отладки аналитических средств (табличных, графических) при анализе полученных результатов, их визуализация.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках проекта государственного задания № FWEU-2021-0003 (рег. номер: AAAA-A21-121012090014-5) Программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2025 гг.

#### Список источников

- 1. Бушуев В.В. Энергетическая безопасность России / В.В. Бушуев, Н.И. Воропай, А.М. Мастепанов, Ю.К. Шафраник и др. Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1998. 302 с.
- 2. Пяткова Н.И. Энергетическая безопасность России: проблемы и пути решения / Н.И. Пяткова и др.; отв. ред. Н.И. Воропай, М.Б. Чельцов; Рос. акад. наук, Сиб. Отд-ние, Ин-т систем энергетики им. Л.А. Мелентьева. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. 198 с.
- 3. Сендеров С.М. Обеспечение энергетической безопасности России: выбор приоритетов / С.М. Сендеров, В.И. Рабчук, Н.И. Пяткова, и др.; отв. ред. С.М. Сендеров. Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т систем энергетики им. Л.А. Мелентьева. Новосибирск: Наука, 2017. 116 с. ISBN 978-5-02-038735-5.
- 4. Доктрина энергетической безопасности Российской Федерации. URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201905140010?index=0&rangeSize=1 (дата обращения: 16.05.2019).
- 5. Рабчук В.И. Стратегические угрозы энергетической безопасности России до 2030 г.: характер трансформации и приоритетные меры по минимизации последствий реализации / В.И. Рабчук, С.М. Сендеров // Известия РАН. Энергетика, 2019. № 1. С. 50-58.
- 6. Сендеров С.М., Рабчук В.И. Ожидаемые направления и масштабы трансформации стратегических угроз энергетической безопасности России в ближайшей и среднесрочной перспективе // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Вып. 71. Надежность энергоснабжения потребителей в условиях их цифровизации, 2020. С.49-59.
- 7. Тихонов С. Эксперты: Россия сможет компенсировать потерю газового рынка ЕС уже к 2030 году / С.Тихонов // Российская газета Федеральный выпуск: №221(9463) 01.10.2024. URL: https://rg.ru/2024/09/26/eksperty-rossiia-mozhet-kompensirovat-poteriu-gazovogo-rynka-es-uzhe-k-2030-godu.html.
- 8. Белогорьев А. Перспективы экспорта российского газа. / А.Белогорьев // Энергетическая политика, 2023. 11(190). C.42-54.
- 9. Едовина Т. Меньше, но дороже. Экспорт нефти из РФ потерял в объеме, но вырос в деньгах / Т.Едовина // Газета «Коммерсантъ» №145 от 14.08.2024
- 10. Министерство энергетики РФ. Поставки российского угля. URL: https://minenergo.gov.ru/industries/coal/main-indicators/russian-coal-supplies.
- 11. Зайнуллин Е. Кокс под запретом / Е. Зайнуллин // Газета «Коммерсантъ», 2024. №185.
- 12. Башкатова А. Отечественным производителям не хватило отечественного / А. Башкатова // Независимая газета, 2024. №106(9021).
- 13. ИНП РАН. Российская промышленность в мае 2024: обзор. М.: ИНП РАН, 2024.
- 14. Вислогузов В. Июль добавил триллион / В. Вислогузов // Газета «Коммерсантъ», 2024. №139.
- 15. Сендеров С.М. Надежность топливо- и энергоснабжения потребителей с позиций обеспечения энергетической безопасности/ С.М. Сендеров и др. // ИСЭМ СО РАН. Новосибирск: СО РАН, 2022. 132 с.

- 16. Пяткова Н.И. Технология вычислительного эксперимента в исследованиях работы энергетических отраслей при реализации угроз энергетической безопасности / Н.И. Пяткова, А.Г., Массель Т.Г. Мамедов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2021. №3(23). С. 62-71.
- 17. Сергеев М. Летом энергетикам мешала жара, а зимой майнеры / М. Сергеев // Независимая газета, 2024. №215(9130).

**Пяткова Наталья Ивановна.** Старший научный сотрудник ИСЭМ СО РАН, кандидат технических наук. Область научных интересов: разработка и применение математических моделей для исследований развития и функционирования ТЭК с учетом факторов энергетической безопасности. AuthorID: 417598, SPIN: 5513-5044, ORCID: 0000-0001-7751-1130, nata@isem.irk.ru. Россия, Иркутск, Лермонтова, д.130.

**Мамедов Тимур Габилович.** Младший научный сотрудник ИСЭМ СО РАН. AuthorID: 1040958, SPIN: 2011-2120, Scopus AuthorID: 58026460700, ORCID: 0000-0002-3396-5074, mamedowtymur@yandex.ru. Россия, Иркутск, Лермонтова, д.130.

UDC 004.8:620.9

DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.010

# Features of the threats impact study on the energy supply reliability in modern conditions

### Natalia I. Pyatkova, Timur G. Mamedov

Melentiev Energy systems institute of SB RAS,

Russia, Irkutsk, nata@isem.irk.ru

**Abstract.** The relevance of studying threats to energy security in modern conditions is increasing and imposes new requirements on models and tools for conducting research on analyzing the impact of threats to the normal functioning and development of energy industries and ensuring reliable energy supply to consumers. Taking into account external and internal factors forms the requirements for the applied models and tools for conducting research on assessing the impact of threats on the energy supplies reliability to consumers. The article presents a description of the factors taken into account in the model, a diagram of working with the model and a test example.

**Keywords:** energy security, energy supply reliability, threats to energy security, economic and mathematical model

**Acknowledgments.** The work was carried out within the framework of the state assignment project No. FWEU-2021-0003 (reg. number: AAAA-A21-121012090014-5) of the Fundamental Research Program of the Russian Federation for 2021-2030.

#### References

- 1. Bushuev V.V., Voropai N.I., Masterpanov A.M., Shafranik Yu.K. et al. Energeticheskaya bezopasnost' Rossii [Energy Security of Russia]. Novosibirsk, Nauka. Sibirskaya izdatel'skaya firma RAN [Nauka. Siberian Publishing Firm of RAS] Publ., 1998, 302 p.
- Pyatkova N.I., et al. Energeticheskaya bezopasnost' Rossii: problemy i puti resheniya [Energy Security of Russia: Problems and Solutions]. Ed. by N.I. Voropai, M.B. Chel'tsov. Novosibirsk, Izdatel'stvo SO RAN [SB RAS Publishing House] Publ., 2011, 198 p.
- 3. Senderov S.M., Rabchuk V.I., Pyatkova N.I. [et al.]. Obespecheniye energeticheskoy bezopasnosti Rossii: vybor prioritetov [Ensuring Russia's Energy Security: Priority Selection]. Ed. by S.M. Senderov. Novosibirsk, Nauka [Science] Publ., 2017, 116 p. ISBN 978-5-02-038735-5.
- 4. Doktrina energeticheskoy bezopasnosti Rossiyskoy Federatsii [Energy Security Doctrine of the Russian Federation], available at: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201905140010?index=0&rangeSize=1 (accessed: 05/16/2019).
- 5. Rabchuk V.I., Senderov S.M. Strategicheskiye ugrozy energeticheskoy bezopasnosti Rossii do 2030 g.: kharakter transformatsii i prioritetnyye mery po minimizatsii posledstviy realizatsii [Strategic threats to Russia's energy security until 2030: the nature of transformation and priority measures to minimize the consequences of their realization]. Izvestiya RAN. Energetika [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering], 2019, no. 1, pp. 50-58.

- 6. Senderov S.M., Rabchuk V.I. Ozhidayemyye napravleniya i masshtaby transformatsii strategicheskikh ugroz energeticheskoy bezopasnosti Rossii v blizhayshey i srednesrochnoy perspektive [Expected directions and scale of transformation of strategic threats to Russia's energy security in the near and medium term]. Metodicheskiye voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shikh sistem energetiki: Vyp. 71. Nadezhnost' energosnabzheniya potrebiteley v usloviyakh ikh tsifrovizatsii [Methodological issues of research on the reliability of large energy systems: Issue 71. Reliability of consumer energy supply in the context of their digitalization], 2020, pp. 49-59.
- 7. Tikhonov S. Eksperty: Rossiya smozhet kompensirovat' poteryu gazovogo rynka ES uzhe k 2030 godu [Experts: Russia will be able to compensate for the loss of the EU gas market by 2030]. Rossiyskaya gazeta Federal'nyy vypusk [Russian Newspaper Federal Issue], 2024, no. 221(9463). Available at: https://rg.ru/2024/09/26/eksperty-rossiia-mozhet-kompensirovat-poteriu-gazovogo-rynka-es-uzhe-k-2030-godu.html (accessed: 10/01/2024).
- 8. Belogor'ev A. Perspektivy eksporta rossiyskogo gaza [Prospects for Russian gas exports]. Energeticheskaya politika [Energy Policy], 2023, no. 11(190), pp. 42-54.
- 9. Edovina T. Men'she, no dorozhe. Eksport nefti iz RF poteryal v ob"eme, no vyros v den'gakh [Less, but more expensive. Russian oil exports lost in volume but grew in money]. Gazeta "Kommersant", 2024, no. 145.
- 10. Ministerstvo energetiki RF. Postavki rossiyskogo uglya [Ministry of Energy of the Russian Federation. Supplies of Russian coal], available at: https://minenergo.gov.ru/industries/coal/main-indicators/russian-coal-supplies (accessed: [add access date]).
- 11. Zaynullin E. Koks pod zapretom [Coke under ban]. Gazeta "Kommersant", 2024, no. 185.
- 12. Bashkatova A. Otechestvennym proizvoditelyam ne khvatilo otechestvennogo [Domestic producers lacked domestic products]. Nezavisimaya gazeta [Independent Newspaper], 2024, no. 106(9021).
- 13. INP RAN. Rossiyskaya promyshlennost' v maye 2024: obzor [Russian Industry in May 2024: Review]. Moscow, INP RAN [Institute for National Economic Forecasting of RAS] Publ., 2024.
- 14. Visloguzov V. Iyul' dobavil trillion [July added a trillion]. Gazeta "Kommersant", 2024, no. 139.
- 15. Senderov S.M. [et al.]. Nadezhnost' toplivo- i energosnabzheniya potrebiteley s pozitsiy obespecheniya energeticheskoy bezopasnosti [Reliability of fuel and energy supply to consumers from the standpoint of ensuring energy security]. Novosibirsk, ISEM SO RAN [Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences] Publ., 2022, 132 p.
- 16. Pyatkova N.I., Massel' A.G., Mamedov T.G. Tekhnologiya vychislitel'nogo eksperimenta v issledovaniyakh raboty energeticheskikh otrasley pri realizatsii ugroz energeticheskoy bezopasnosti [Technology of computational experiment in studies of the energy sectors' operation under the realization of energy security threats]. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and Mathematical Technologies in Science and Management], 2021, no. 3(23), pp. 62-71.
- 17. Sergeyev M. Letom energetikam meshala zhara, a zimoy maynery [In summer, energy workers were hindered by heat, in winter by miners]. Nezavisimaya gazeta [Independent Newspaper], 2024, no. 215(9130).

Pyatkova Natalia Ivanovna. Senior Researcher at the Institute of Economics and Management SB RAS, PhD in Engineering. Research interests: development and application of mathematical models for studying the development and operation of the fuel and energy complex, taking into account energy security factors. AuthorID: 417598, SPIN: 5513-5044, ORCID: 0000-0001-7751-1130, nata@isem.irk.ru Russia, Irkutsk, Lermontov St., 130.

Mamedov Timur Gabilovich. Junior Researcher at the Institute of Economics and Management SB RAS. AuthorID: 1040958, SPIN: 2011-2120, Scopus AuthorID: 58026460700, ORCID: 0000-0002-3396-5074, mamedowtymur@yandex.ru. Russia, Irkutsk, Lermontov St., 130.

Статья поступила в редакцию 12.07.2025; одобрена после рецензирования 17.09.2025; принята к публикации 04.10.2025.

The article was submitted 07/12/2025; approved after reviewing 09/17/2025; accepted for publication 10/04/2025.

## Цифровая экономика и управление

УДК 519.876.2

DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.011

# Моделирование представлений агента в интеллектуальной организации Виноградов Геннадий Павлович

НИИ Центрпрограммсистем,

Poccuя, Тверь, wgp272ng@mail.ru

Аннотация. Актуальность. Совместная работа интеллектуальных агентов (персонала) в составе организации делает актуальными исследования по разработке методов согласования восприятия ситуации целеустремленного состояния, целей, интересов, ценностей, норм и создания общих представлений о ситуации выбора. Цель работы. Используя принцип параллельного восприятия, предложить подход и модель согласования восприятия и представлений о ситуации выбора. Это обеспечивает: а) расширение диапазона подходов при формировании стратегии и тактики эволюции организационной системы; б) раннее обнаружение и понимание тенденций и формирование согласованного представления о будущем; г) базу для экспериментирования и предвидения новых идей; д) наращивание потенциала для саморазвития; е) укрепление и развитие интеллектуального капитала организации; з) согласованное представление о проблемах. Использованы методы теории нечетких множеств, теории активных систем, теории нечетких моделей и сетей. Основные результаты. Введено понятие субъективного представления о предметной области. Для формализации представлений предложено использовать нечеткую продукционную модель. Приведены описание структуры представлений и один из вариантов ее адаптации. Рассмотрены способы оценки полезности модели представлений и ее формализации. Для описания модели обучения организации предложен подход, основанный на гипотезе общности целей и интересов персонала (агентов) системы. Справедливость этой гипотезы следует из очевидного факта, что в организации, вследствие разделения труда, результат каждого зависит от совместных усилий всех. Следовательно, индивидуальные вклады агентов, основанные на озарении, интуиции, знании, опыте, располагаемой информации конкретного агента с отличающимися друг от друга ценностями, нормами, представлениями, структурами целей, способностями, когда они собираются вместе для выполнения некоторой работы, и определяют будущий результат.

Ключевые слова: модель, интеллектуальный агент, паттерн, знания, адаптация

**Цитирование:** Виноградов Г.П. Моделирование представлений агента в интеллектуальной организации / Г.П. Виноградов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. − № 4(40). − C. 138-150. − DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.011.

Введение. Под интеллектуальной организацией понимается организация, способная доминировать в условиях неопределённости и риска за счет стимулирования появления креативных идей, процессов и моделей поведения, позволяющих превратить идеи в бизнесрешения [1]. Совместная работа интеллектуальных агентов (персонала) в составе организации предполагает согласование восприятия ситуации целеустремленного состояния, целей, интересов, ценностей, норм и создание общих представлений о ситуации выбора [2]. На основе согласованных представлений принимается согласованный план действия и выполняются конкретные действия для достижения согласованной цели (целей) организации. При этом должны быть удовлетворены ожидания каждого отдельного агента. Это создает основу для концентрирования внимания каждого к выявлению резервов, формулированию проблем и ошибок, что позволяет контролировать весь процесс, изменяя его по мере необходимости [3, 4]. Эта форма контроля ведет к новому уровню понимания проблем, появлению новой информации и знания, которые также должны быть проработаны с целью получения нового согласованного понимания ситуации и выработки нового согласованного плана действий. Этот циклический процесс продолжается постоянно и является основой прогрессивной эволюции организации [5].

Предлагаемая модель включает в себя два цикла: а) цикл формирования согласованного представления о ситуации выбора и согласованного стратегического плана действий; б) цикл реализации согласованного плана.

Агенты команды, используя принцип параллельного восприятия, на основе различия в восприятии и установках генерируют новые идеи, которые, в свою очередь, являются основой для инноваций. Результатом становится согласование восприятия и представлений о ситуации выбора. Это обеспечивает: а) расширение диапазона подходов при формировании стратегии и тактики эволюции организационной системы; б) раннее обнаружение и понимание тенденций и формирование согласованного представления о будущем; г) базу для экспериментирования и предвидения новых идей; д) наращивание потенциала для саморазвития; е) укрепление и развитие интеллектуального капитала организации; з) согласованное представление о проблемах.

Достижение такого состояния будем называть информационным равновесием. Оно является основой для согласования целей системы и агентов и формирования на этой основе согласованного стратегического плана эволюции организационной системы. Формирование убежденности в реализуемости согласованного плана развития происходит на основе апробации, например, средствами имитационной модели.

Реализация согласованных представлений о целях, способах действия не требует творческого напряжения: все усилия агентов будут направлены на реализацию принятых решений. Каждый агент может четко прогнозировать поведение партнеров (выполняется гипотеза детерминизма за счет принятия каждым агентом согласованных обязательств).

Реализация приведенных схем требует от управляющей системы предвидения поведения, как управляемых субъектов, так и окружения. В условиях неопределённости и риска, когда динамика всех процессов резко меняется и возникают разрывы непрерывности, управление процессом поиска новых идей приобретает критическое значение. Это требует формирования специальных информационных воздействий на персонал организации, целью которого является стимулирование его креативного потенциала или склонение к принятию решений, предопределенных управляющей системой [6].

Модель принятия решений интеллектуальным агентом, предложенная в [7, 8], создала возможность выполнять оценки эффективности такого воздействия до его реализации. Она явилась стимулом к развитию новых методов информационного воздействия и новых моделей выбора агентом, у которого есть внутренние образы себя, центра и других агентов. Это расширяет рамки предметной области теории принятия решений, где считалось, что нельзя воздействовать на представления других агентов о ситуации выбора, что приводило к парадигме предсказания: принимающий решение должен предугадать возможные реакции других агентов в различных ситуациях. Использование модели выбора агента на основе субъективных представлений позволяет существенно сузить рамки парадигмы предсказаний, заменив ее парадигмой предопределения будущего, что создает основу для детерминации поведения агентов.

1. Субъективные представления – основа принятия решений агентом. Агент живет и действует в объективно существующем мире, но все свои действия он осуществляет в соответствии со своими представлениями о предметной области, способах действия, целях и получаемых результатах, демонстрируя тем самым так называемое активное поведение. Результаты, которые получает агент от своих действий, зависят в значительной степени от того, как он воспринимает процессы в предметной области и как строит программы своего поведения. Основой формирования таких программ являются: 1) представления агента о компонентах ситуации выбора, которые следует рассматривать, как модели, и 2) способность агента формировать такие модели. С их помощью агент осуществляет взаимодействие с

окружающим миром путем внутреннего программирования на языке описания представлений. Функциональное назначение представлений — получить возможность моделировать возможные результаты в зависимости от выбираемых действий и состояния внешней среды.

Такой подход согласуется с теоретическими положениями психологии поведения. Так Норман [9] характеризует представления следующим образом: "При взаимодействии с окружающей средой, с другими людьми, и с артефактами технологии, люди формируют внутренние, умственные модели предметных областей, с которыми они взаимодействуют. Эти модели предназначены для понимания взаимодействия с предметной областью, а также прогнозирования возможности получения желаемых состояний при использовании располагаемых способов действия". То есть представления следует рассматривать, как ментальные модели, являющиеся метафорическими представителями реальности, которые люди используют для того, чтобы понять конкретные явления. Отметим, что понимание представлений, как ментальных моделей, также согласуется с теориями, описывающими процессы мышления. Например, Толмен в [10] предлагает считать ментальные модели основой структуры познания: "Сейчас правдоподобно предположить, что ментальные модели играют центральную и объединяющую роль в представлении в сознании субъекта объектов, состояния дел, последовательности событий внешнего окружения, а также представлений о социальных и психологических способах действия в повседневной жизни". Холиок, Нисбет, Тэгард [11] предположили, что ментальные модели являются основой для всех процессов рассуждения: "Модели следует понимать, как сборник синхронных и диахронных правил, организованных в иерархии по умолчанию и кластерным категориям. Правила, включающие модели, должны действовать в соответствии с принципом ограниченного параллелизма, как для конкурирования и кооперирования друг с другом". Шумахера и Червински [12] исследовали роль ментальных моделей в приобретении опыта при решении практических задач и установили следующие характеристики представлениймоделей: 1) они являются неполными и постоянно развиваются; 2) они, как правило, не позволяют точно воспроизводить явления; 3) они, как правило, содержат ошибки и противоречия; 4) они просты и предназначены обеспечить упрощенные объяснения сложных явлений; 5) они часто содержат неопределенности относительно способов действия, которые возможно использовать, даже если это приведет к нежелательным последствиям; б) они могут быть представлены с помощью наборов правил «условие-действие».

Следовательно, реальность агент познает только с помощью им же созданных моделей при данном уровне своих знаний. В ситуации неполной информации представления имеют гипотетико-дедуктивную структуру. Гипотезы выступают попытками разрешить проблемы, дедукция позволяет провести проверку содержания гипотез фактами.

В работе [7] показано, что рациональность является центральным понятием в задачах изучения и моделирования интеллектуального поведения. Концепция рациональности должна применяться с точки зрения субъективных целей, норм, ценностей и представлений агента о ситуации выбора. Это позволяет с единых позиций рассматривать поведение различных агентов в различных средах на основе субъективных представлений об окружении и самом себе.

Методы моделирования должны быть направлены на выявление психических стратегий конкретного человека путем анализа его поведения, речевых паттернов, невербальных реакций в ситуациях целеустремленного состояния, выбора и реализации способов действия. Такой подход предполагает интерактивное взаимодействие исследователя и агента. В процессе этого взаимодействия, которое носит также и итерационный характер, выявляются специфичные когнитивные, лингвистические и поведенческие навыки, используемые субъектом в ситуациях выбора для достижения желаемых результатов. Они, в свою очередь,

отражают его систему ценностей, норм, способностей, убеждений и знаний. Эти структуры выражаются в процедурах формирования решений и реализации их в поведении. В этой связи представляет интерес разработка математических моделей, учитывающих поведение агента на основе теории нечетких систем и теории отношений.

**2. Источники получения нового знания.** Ценность и качество субъективной модели зависит от объемов анализируемых данных (качество и ценность получаемых в результате анализа знаний, естественно, определяется способностями и прочими характеристиками индивида).

Знание о предметной области могут быть актуализированы с помощью специальных алгоритмов активного интеллектуального поиска. Направление поиска определяется постановкой цели анализа. Это может быть расширение множества стратегий при принятии решений, изучение возможностей снятия ограничений, расшивка узких мест и т.д.

На основе собранных в хранилище данных, знаний и оценки их качества (авторефлексия) агентом составляется план направлений поиска новых знаний, а также производится выбор методов и алгоритмов анализа данных, определяются условия их применения. Если данных для выбранных направлений поиска недостаточно, то одновременно создается план направлений сбора нужных данных, в котором определяются источники данных, методы получения информации, условия реализации способов сбора данных и т.п. Реализация планов приводит к увеличению степени актуализации знаний (их обогащению). Оценка их качества, то есть выполнение авторефлексии порождает у агента рост степени удовлетворенности полученными результатами и степени убежденности в соответствии субъективной модели объективной реальности (рефлексия первого рода). Это, в свою очередь, играет роль стимулирующего воздействия и мотивирует агента на выполнение повторной итерации анализа на тех же или новых данных. Изменение обоих указанных выше планов должно приводить к получению нового знания.

Описанный цикл повторяется до тех пор, пока величина прироста нового знания будет либо незначительной величиной, либо результат анализа будет подтверждать то, что уже известно, либо затраты на получение знания будут превосходить потенциальный эффект от их применения. Полученные знания используются для корректировки модели представлений о предметной области у агента, на основе которой принимаются и реализуются решения на практике.

Реализация решений приводит к изменению состояния предметной области и окружения объекта, которые образует среду, из которой поступают данные. Анализ полученных результатов функционирования объекта, степени достижения целей, эффективности является основой для стимулирования агента. Он, в свою очередь, используя свои собственные критерии, выполняет оценку достижения своих собственных личных целей. Полученные оценки определяют его мотивацию, и, следовательно, поведение.

При возникновении проблемы, когда агент находится в состоянии целеустремленного стремления, ее решение требует от него творческих усилий. В состоянии творчества у агента рассеивается восприятие, так как у него нет ни модели предметной области, ни алгоритма решения проблемы. Он начинает вести поиск в разных направлениях. Для этого он формулирует вопросы, на которые ищет ответа чаще всего путем экспериментирования. В процессе экспериментирования (на этапе анализа) целое разделяется на части, которые исследуются с различных точек зрения. Первоначально представление агента имеет вид противоречивой картины, части которой никак не складываются вместе. Постепенно по результатам анализа части складываются, возникает гипотеза, убежденность правдоподобности в которой выше, чем у других конкурирующих гипотез (наступает этап синтеза). Восприятие агента фокусируется и направляется на поиск доказательств, ее

подтверждающих или фальсифицирующих. В результате формируется концептуальная модель и на ее основе определяется алгоритм решения проблемы.

Основная идея описанной схемы состоит в построении целеустремленной самоорганизующейся системы формирования знаний о предметной области в выбранном направлении. Поскольку данные распределены по источникам их формирования, то возникает необходимость использования сетевой экспертизы [6].

3. Формализация представлений. В модели выбора представление — это та часть окружения агента, которая им воспринимается и осознается. Оно является результатом фильтрации его уникальным опытом, культурой, языком, убеждениями, интересами, предположениями и неврологией. Фильтрация позволяет упростить результат восприятия, чтобы можно было осмыслить воспринимаемое. Степень упрощения определяется целями и зависит от способностей. Качество представлений определяется не точностью или адекватностью, а полезностью при достижении желаемых состояний. Описание представлений средствами языка образует модель, которая может «отуждаться» от ее создателя, «читаться», «пониматься» другими агентами при коммуникации. Языковые возможности субъекта являются фильтрами при описании представлений. Модели не рассчитаны на отражение либо конструирование единственной объективной реальности, их задача заключается в том, чтобы воспроизвести какой-либо аспект возможной реальности. Поэтому не имеет значения «истинность» модели, учитывается лишь «убежденность в ее полезности». Полезность модели зависит от степени, в которой она позволяет совершить эффективный переход из одного целеустремленного состояния в другое.

Для вербального описания представлений агента наиболее предпочтительно применять нечеткое отношение моделирования  $R: E \times M \to [0,1][13]$ . Его использование позволяет описать причинно-следственную связь между наблюдаемым состоянием компонентов или параметров ситуации целеустремленного состояния и внутренним представлением агента о ней в виде лингвистических переменных. Для описания влияния выделенных агентом факторов на результаты  $o_i^k$ ,  $i=\overline{1,m}$  будем использовать аппроксимацию представлений в виде нечетких продукционных правил, которые имеют вид:

Если 
$$x_1$$
 есть  $x_2$  есть  $x_2$  есть  $x_2$  и ... и если  $x_N$  есть  $x_N$  , то 
$$o_i^k = f_{ir}^k(x_1, x_2, ..., x_N), r = \overline{1, R}, i = \overline{1, m},$$
 (1)

где R — количество продукционных правил, r — номер текущего продукционного правила,  $o_i^k = f_{ir}^k(x_1, x_2, ..., x_N)$  — четкая функция, отражающая представление агента о функциональной связи входных факторов с возможными результатами для r-го правила (r-ая частная модель);  $A_{ri}^k$  — нечеткие переменные, определенные на  $X^k = \{x_i^k, i = \overline{1,N}\}$ .

В качестве функции  $f_{ir}(ullet)$  могут использоваться, например, формальные модели, модели, словесное описание. Функции  $f_{ir}(ullet)$  могут быть заданы графиком, таблицей, алгоритмом вычисления т.д.

- **3.1.** Описание структуры представлений агента. Пусть в ситуации выбора участвует множество  $N = \{1, 2, ..., n\}$  агентов. Если присутствует неопределенный параметр  $\theta \in \Omega$  (будем считать, что множество  $\Omega$  является общим знанием), то *структура представлений I\_i i-го* агента включает в себя следующие элементы [14]:
  - 1. представление *i*-го агента о параметре  $\theta$  обозначим его  $\theta_i$ ,  $\theta_i \in \Omega$ ;

- 2. представления *i*-го агента о представлениях других агентов о параметре  $\theta$  обозначим их  $\theta_{ij}$ ,  $\theta_{ij} \in \Omega$ ;
- 3. представления i-го агента о представлении j-го агента о представлении k-го агента обозначим их  $\theta_{ijk}$ ,  $\theta_{ijk} \in \Omega$ , j,  $k \in N$  и так далее, что образует иерархию представлений i-го агента.

Структура представлений  $I_i$  i-го агента задается набором всевозможных значений вида  $\theta_{ij}$ , где l пробегает множество целых неотрицательных чисел,  $j_1, ..., j_l \in N$ , а  $\theta_{ij} \in \Omega$ . Для формирования своих представлений агент использует следующие источники информации о состоянии внешней среды и окружения [14]:

- 1) априорная частная информация  $\omega_k(\theta) \subseteq \Omega$  (этот вид информации в литературе называется знание, опыт);
- 2) действия других агентов: наблюдая их и предполагая, что оппоненты действуют рационально, агент может (при выполнении предположения об общем знании) оценивать информацию q(c) о состоянии природы, на основании которой был выполнен выбор способа действия i-м агентом ( $i \neq k$ );
- 3) множество g результатов выбора агентов на основании этой информации агент может сделать вывод о тех состояниях природы, при которых выбранный способ действия приводит к наблюдаемым выигрышам;
- 4) множество  $\rho \subseteq \Omega$  состояний природы, при которых наблюдаемый вектор действий агентов приводит именно к данному наблюдаемому значению o результата системы:

$$\sigma(c,o) = \{ \theta \in \Omega / G(\theta(c)) = o \}.$$

**3.2. Модели адаптации представлений агента.** Специфика формирования представлений агентом состоит, в частности, в том, что он в качестве информации для корректировки своих представлений о неопределенном параметре может использовать не только результаты наблюдения за внешней средой, но и результаты наблюдения за действиями и результатами деятельности других агентов, пытаясь «объяснить», почему они выбрали именно эти действия.

Рассмотрим описание модели ситуации выбора, включающей в себя  $n \in \mathbb{N} = \{1, 2, ..., n\}$  агентов. Пусть  $\theta \in \Omega$  — состояние природы, описывающее все существенные характеристики внешней среды. Агент с номером  $i \in \mathbb{N}$  имеет интервальную информацию  $\omega_i(\theta) \subseteq \Omega$  о состоянии природы, причем эта информация не противоречит истинному положению дел, то есть  $\forall \theta \in \Omega, \ \forall i \in \mathbb{N}, \ \theta \in \omega_i(\theta)$ .

Результат  $o=G(\theta,x)$  агента зависит от вектора  $c=(c_1,c_2,...,c_n)\in C'=\prod_{i\in N}C_i$  действий других агентов, связанных с агентом, принимающим решение, где  $c_i\in C_i$ , и  $\theta$  — состояния природы. Будем считать, что каждый агент наблюдает вектор действий всех агентов, общий результат и выигрыши всех агентов.

Предположим, что удельная ценность выбора каждого агента зависит от состояния природы  $\theta$  и результата o всех участников ситуации выбора:  $EV_k(o) = f_k(\theta, G(c,\theta)), \ k \in K$ . Обозначим множество параметрических равновесий Нэша (параметром является значение состояния природы, которое определяет структуру и уровень представлений агента) через:

$$\begin{split} E_{N}(\theta \;) = & \{ \{c_{k} \; \}_{k \in K} \in C^{'} \; / \; \forall k \in K, \; \forall c_{k} \in C_{k} \; \; f_{k}(\theta \;, \; G(\theta(c_{1}, ..., c_{K} \;)) \geq \\ & \geq f_{k}(\theta \;, \; G(\theta \;, c_{1}, ..., c_{k-1}, y_{k}, ..., c_{k+1}, ..., c_{K})) \}. \end{split}$$

Если множество  $\Omega_0$  возможных значений состояний природы является общим знанием среди агентов, то, предполагая, что они устраняют неопределенность вычислением максимального гарантированного результата, получим следующее множество равновесий их игры:

$$\begin{split} E(\Omega_{0}) = & \{\{c_{k}\}_{k \in K} \in C^{'} / \forall k \in K, \, \forall y_{k} \in C_{k} \\ \min \ f_{k}(\theta, G(\theta, c_{1}, ..., c_{K})) \geq \min \ f_{k}(\theta, G(\theta, c_{1}, ..., c_{k-1}, y_{k}, ..., c_{k+1}, ..., c_{K}))\}. \\ \theta \in & \Omega_{0} \end{split}$$

Обозначим  $q(c) \subseteq \Omega$  — множество состояний природы, при которых наблюдаемый агентами вектор их действий является равновесием:

$$q(c) = \{ \theta \in \Omega / \exists \Omega_0 : \theta \in \Omega_0 \}.$$

Пусть  $g = (g_1, ..., g_n) \in \Re^n$  – наблюдаемый агентами вектор значений их целевых функций, тогда множество тех значений состояний природы, при которых (наряду с наблюдаемым результатом o) могут реализоваться наблюдаемые выигрыши агентов g, имеют вид

$$\eta(g,o) = \left\{ \theta \in \Omega \, | \, f_j(\theta,o) = g_j, j \in K \right\}.$$

Поскольку вектор  $g=(g_1,g_2,...,g_n)\in \mathfrak{R}^n$  определяется через  $EV_k$ , то вектор  $V=\{v_1,...,v_k\}\in \Theta^n$ , будет определять требуемый уровень представлений агентов в ситуации выбора.

**4.** Представления как субъективная модель, связывающая способы действия и результат. Необходимость учета при моделировании поведения агента его убежденности в адекватности своих представлений о ситуации выбора предполагает введение в модель выбора лингвистической переменной *«убежденность»*. Интервал [0, 1] используется как универсальное множество для задания лингвистической переменной *«убежденность»* с термами *«убежден»* и *«не убежден»* с функциями принадлежности, предложенными Л. Заде [15].

Убежденность - это объект, который существует только в сознании агента. Агент использует его для выражения своего отношения к своим представлениям об объекте, то есть он занимает определенную позицию по отношению к своим представлениям. Будем обозначать такое отношение как <math>Убежденность(агент, x), где x – это представление. Оно может существовать, например, в виде (1).

Если существует преобразование *объект*  $\rightarrow$  *представление*, то существует и обратное преобразование *представление*  $\rightarrow$  *объект*, которое следует положить в основу описания способности агента рассуждать о своих убеждениях. Правомерность такого утверждения следует из того факта, что субъект (при рациональной форме поведения) стремится к изоморфности представлений к объекту. Для этого он оценивает адекватность представлений некоторым набором параметров  $K = \{h_i, i = \overline{1,n}\}$ .

Пусть  $h_j: K \to [0,1]$  — частная оценка j-го показателя. Она может вычисляться как субъективно, так и объективно. Пусть нечеткая мера для  $(K, 2^K)$  является субъективной мерой, выражающей степень важности подмножеств из K. Например,  $g(h_1)$  выражает степень важности показателя  $h_1$  при оценке агентом соответствия представлений объекту. Тогда интеграл

$$\int_{Y} h(k) \circ g(\cdot) = \sup_{\alpha \in [0,1]} \{ \alpha \wedge g(M(\alpha)) \}$$

позволяет вычислить обобщенную оценку качества представлений. Здесь  $M_{\alpha} = \{x \mid \mu(x) \geq \alpha\}$  уровневое множество. Очевидно, что существует  $\varphi \colon J \to [0,1]$ , которое позволяет вводить в модель субъективную оценку убежденности. Использование нечеткого интеграла позволяет вычислять нечеткое ожидаемое значение результата. Как показано в [16], с помощью нечеткого интеграла можно моделировать принятие решений, по средневзвешенной оценке, (линейная свертка). Это связано с тем, что в задачах многокритериального выбора нечеткий интеграл обеспечивает получение решения, соответствующего медиане, которая в порядковых шкалах является аналогом среднего. Поскольку в этом случае ослабляется условие суммы для коэффициентов важности критериев и вводится формализация, основанная на монотонности оценок, то полученная интегральная оценка будет практически совпадать с интуитивными ожиданиями человека. Приведенные рассуждения позволяют предложить следующий алгоритм вычисления степени убежденности.

Пусть описанные выше показатели качества построенной модели представлений образуют вектор  $Z = \{z_j, j = \overline{1,k}\}$ . Тогда очевидно, что Z будет зависеть от вектора параметров функций принадлежности  $W = \{w_i, i = \overline{1,m}\}$ , которые для агента образуют вектор управляющих переменных, выбором которых он может обеспечить требуемый уровень прогностической эффективности модели представлений.

Будем предполагать, что агент обладает достаточно высокой квалификацией и опытом, то есть его шкала ценностей определена таким образом, что различные наборы показателей имеют для него неодинаковое значение. Это позволяет предположить существование у него непрерывного монотонно возрастающего по каждому показателю квазивогнутого индикатора предпочтений U(Z), такого, что

$$\begin{split} & Z(W^{(1)}) \succ Z(W^{(2)}) \Longleftrightarrow U(Z(W^{(1)})) > UZ(W^{(2)})) \\ & Z(W^{(1)}) \sim Z(W^{(2)}) \Longleftrightarrow U(Z(W^{(1)})) = UZ(W^{(2)})) \end{split}$$

где  $W^{(1)}$ ,  $W^{(2)} \in \Omega_W$  (здесь  $\Omega_W$  – множество допустимых значений управляющих переменных).

Сделанное предположение относительно функции U(Z(W)) позволяет определить решение задачи векторной оптимизации, как множество точек  $\{w_i^0\}$ , максимизирующих

функцию 
$$U(Z(W))$$
, таких, что:  $W^0=\{w_i^0,\,i=\overline{1,m}\}\in\Omega_W^-$  и 
$$Arg\,\max U(z_1^-(W),...,z_m^-(W)).$$

Для найденных значений  $W^0 \in \Omega_W$  должно выполняться условие оптимальности по Парето и поиск решения должен проходить по паретовой границе множества Z(W).

Функция U(Z(W)) в явном виде, как правило, неизвестна, поэтому для определения оптимальных величин целесообразно использовать интерактивные процедуры. Для этого выбирается некоторое решение  $W^{(1)}$ , с использованием информации, получаемой от агента, определяется поведение  $U(Z(\bullet))$  в окрестности точки  $W^{(1)}$  и на этой основе строится последовательность решений  $\{W^{(i)}\}$ , которая при определенных условиях сходится к  $W^{(i)}$ .

Однако, часто множество E(Z(W)) невыпуклое и поиск в пространстве решений сопряжен со значительными трудностями. Поэтому паретову границу целесообразно параметризировать элементами более простого множества A. Из известных процедур параметризации для целей оптимизации прогностических свойств модели представлений наиболее подходящей является процедура ассортиментной параметризации [16]:

 $U(Z(W)) = U(\alpha, Z(W)) = \langle \alpha, W \rangle$ , где  $\langle \bullet \rangle$  – означает скалярное произведение,

 $lpha \in A, \ \ \{lpha_j \geq 0, \ \ \sum\limits_{j=1}^k lpha_j = 1\}$  . При этом выполняются условия:

$$\forall W \in \Pi_W, \exists \alpha(W) \in A$$
:

$$W(\alpha) = Arg \max U(\alpha(W), Z(W)) = W^{0}$$

 $\forall \alpha \in A, \ \exists W(\alpha) \in \Pi_W$ , где  $\Pi_W$  – область Парето.

Пусть  $V^*$  — совокупность предпочтительных с точки зрения агента показателей Z(W), причем  $V^* \neq \emptyset$  и  $V^* \in E(Z(W))$ , тогда согласно принятой процедуре параметризации,  $V^*$  можно представить как  $V^* = \sigma(A^*)$ , где  $A^*$  — множество максимальных элементов отношения  $\succ$ , определяемых предпочтениями агента на множестве параметров A, по правилу  $\alpha_1 \succ \alpha_2 \Leftrightarrow \sigma(\alpha_1) \geq \sigma(\alpha_2)$ ;  $\alpha_1, \alpha_2 \in A$ . Тогда задача принятия решения по выбору оптимальных структуры и параметров модели представлений может быть записана в виде:

$$U^*(\alpha) \to \max, \ \alpha \in A,$$
 (2)

где  $U^*=U^*\sigma$ .

Таким образом, произведена параметрическая декомпозиция экстремальной задачи  $U(Z(W)),\ W \in \Omega_W,\ Z(W) \in \Omega_Z$  на задачу вычисления  $\sigma$  и задачу  $\max U(\sigma(\alpha)),\ \alpha \in A$ . Такая декомпозиция распределяет роли в человеко-машинном диалоге следующим образом:

- на ЭВМ вычисляется параметризация  $\sigma$ , которая для ассортиментной параметризации имеет вид max  $\Psi$  при Z(W)≥ $\alpha Z$ ;
- агент участвует в решении задачи (2).

В качестве формальной основы диалоговой процедуры построения модели представлений следует воспользоваться методами прямого поиска, не требующими информации о производных целевой функции, так как латентными факторами выступают качественные признаки, и, кроме того, функция  $U(\bullet)$  предпочтений агента, в общем случае, не является дифференцируемой. Наибольший эффект следует ожидать от применения методов случайного поиска.

При организации диалога с агентом использовалась следующая модель его реакции на предъявленное решение. По двум решениям  $Z(W^{(1)})$ и  $Z(W^{(2)})$  агент сообщает вектор с компонентами:  $\xi_i$   $i=\overline{1,k}$ , такой, что:

$$\xi_i = \begin{cases} +1, \text{изменение } i - \text{го критерия} \\ \text{предпочтительно;} \\ -1, \text{в противном случае;} \\ 0, \text{изменение } i - \text{го критерия безразлично.} \end{cases}$$

Общая структура алгоритма случайного поиска для задачи построения модели представлений имеет следующий вид:  $\alpha(s+1) = \alpha(s) + \vartheta(s+1)$ ,

где s — номер обращения к агенту,  $\mathfrak{S}(s+1)$ , — вариация вектора  $\alpha$ , определяется в пространстве случайных векторов в зависимости от модели реакции агента.

При  $\xi_i$  =0 вариацию  $\alpha_i$  следует положить равной 0. В остальных случаях целесообразно использовать алгоритм с поощрением случайностью:

$$\vartheta_i(s+1) =$$
  $\begin{cases} \gamma(s+1)r_i(s+1) \text{ при } \xi_i \geq 0 \\ \gamma(s)r_i(s) \text{ при } \xi_i < 0, \end{cases}$ 

где  $\gamma(s+1)$  — скаляр, выбранный из условий сходимости. Например, в случае, если в результате двух шагов  $U(\alpha, Z(W(\alpha)))$  возрастает, тогда  $\gamma(s)=d\cdot\gamma(s-1)$ , где d — параметр акселерации [10].

Ускорение сходимости описанного выше алгоритма возможно за счет более полного учета информации о направлении поиска в пространстве решений, получаемой от агента.

**5. Модель параллельного восприятия.** Агент принимает решения, используя свои собственные представления об исследуемом явлении, которые образуют его субъективную модель процесса, явления. Эта модель является абстрактной системой, все элементы которой являются понятиями, используемыми для отражения природы исследуемого объекта. Понятия являются абстракциями и описывают существенные свойства объекта исследования. Степень существенности свойства является субъективной характеристикой и зависит, во-первых, от цели исследования, и, во-вторых, определяется точкой зрения, знаниями и убеждениями агента. Субъективная модель является отражением в его сознании природной, или, как ее иначе называют, объективной реальностью и в этом смысле она образует особую форму реальности — субъективную реальность [7, 13].

Любой индивид способен оценивать свои представления о объективной реальности (качество субъективной модели), ход рассуждений, принципы логического вывода и т.п., что позволяет говорить о наличии в сознании контура адаптации и самоорганизации субъективной модели. Такое отражение называется авторефлексией. Свои представления об объективной реальности, ходе рассуждений, принципах принятия решений и т.д., агент соотносит моделями выбора, существующими у других индивидов. Такое отражение называется рефлексией второго рода.

Таким образом, субъективная модель всегда состоит из трех составляющих:

- собственно модель представлений о исследуемой (анализируемой) предметной области;
- модель оценки качества собственных представлений, интегративной характеристикой которой является степень убежденности (правоты) в правильности построенной системы представлений;
- модель представлений о знании данной предметной области у других субъектов.

Субъективная модель представлений наряду с такими характеристиками, как способности, мотивация определяют его индивидуальную эффективность. Индивидуальная эффективность – результат выполнения работником поставленных задач с учетом затрат на их реализацию.

Поскольку каждый специалист должен рассматриваться при восприятии как фильтр информации, то модель движения к согласованному плану действия требует формирования согласованного представления о ситуации целеустремленного состояния, что, в свою очередь, предполагает построение параллельного восприятия ситуации с различных точек зрения. Это предполагает переход от индивидуального творческого потенциала к командной работе. Это означает, что каждый занятый в проекте должен участвовать в его планировании с самого начала. Например, проект создания наукоемкого изделия может быть блестящим с точки зрения выполнения требований потребителей, затрат, эстетических позиций, четкой перспективы маркетинга, но после создания прототипа изделия выясняется, что время и затраты на обслуживания таковы, что это съедает всю прибыль. Этого можно было избежать, если бы на этапе разработки были привлечены специалисты из отдела технического обслуживания. Таким образом, наибольшие усилия по согласованию представлений должны быть сделаны на этапе эскизного проектирования и разработки технических требований, технического проектирования. В этом случае обратная связь несет максимальное количество полезной информации. Привлечение специалистов на различных этапах создания проекта это реализация планов предыдущего этапа и оценка его полезности. Такой подход позволяет получить «достаточно правильное решение» и избежать усовершенствования ради усовершенствования.

Заключение. Рассмотрена модель постоянного развития представлений агентов. При создании наукоемкой продукции совершается первый цикл ее создания и выпуска. На последующих циклах за счет совершенствования представлений производится выпуск усовершенствованных моделей изделия. Персонал, занятый развитием этого изделия, должен стать командой, опирающейся на согласованное, совместное восприятие. Это позволяет на каждом цикле оценить полученные новые знания и определить направление их развития для использования на следующем цикле. Когда будет достигнута точка небольшого улучшения, то этот момент следует рассматривать как начало движения в новом направлении, чтобы избежать застоя. Это момент смены парадигмы, момент выхода из состояния линейного развития, перехода в состояние поиска новой парадигмы. Следовательно, наши парадигмы следует рассматривать, как точки сборки прошлого опыта, а не как предел, ограничивающий новые возможности. Модель постоянного совершенствования требует особой среды, в которой постоянный процесс обучения и поиска является образом жизни.

Цикл «обучение – новация» в процессе постоянного обновления основан на преданном поведении, когда агенты проявляют преданность разумным целям команды. В интеллектуальной организации член группы должен подчиниться необходимым действиям и участвовать в работе, даже если выбранное решение его не устраивает или противоречит его индивидуальной модели восприятия. Одновременно каждый член команды должен быть открыт для восприятия моделей-представлений других участников и готов следовать общему пути, выбранному командой в целом.

Предложенный подход может быть положен в основу построения интеллектуальных систем и предполагает:

- 1) разработку принципов построения эволюционных адаптивных баз данных и знаний;
- 2) разработку методов обработки данных на основе применения "активной" логической сети правил, управляемой потоком данных;
- 3) разработку методов быстрого поиска маршрута логического вывода на основе построения многополюсной сети правил и поиска ее минимального разреза;
- 4) разработку методов распараллеливания потоковой обработки взаимозависимых данных путем построения виртуальных потоковых баз данных.

**Конфликт интересов.** Процесс написания и содержание статьи не дают оснований для постановки вопроса о конфликте интересов.

### Список источников

- 1. Рубинштейн М.Ф. Интеллектуальная организация: Привнеси будущее в настоящее и преврати творческие идеи в бизнес-решения / М.Ф. Рубинштейн, А.Р. Фирстенберг. М.: ИНФРА-М, 2003. 190 с.
- 2. Vinogradov G.P., Konyukhov I.A. Patterns in Smart Wireless Sensor Network Nodes. International Scientific Conference "Information Technologies for Industry" (IITI'22). Lecture notes in networks and systems, Springer Nature Switzerland AG, 2022, pp. 73–82.
- 3. Winkler M., Tuchs K.-D., Hughes K., Barclay G. Theoretical and practical aspects of military wireless sensor networks. Journal of telecommunications and information technology, 2008, no. 2, pp. 37-45.
- 4. Ларионова Н.И. Поведенческая и экспериментальная экономика: учебное пособие / Н.И. Ларионова, Ю.А. Варламова, Ю.Л. Одинцова, И.А. Кабашева. Казань: Издательство Казанского университета, 2022. 112 с.
- 5. Mikusz M. Towards an understanding of cyber-physical systems as industrial software-product-service systems. Procedia CIRP, 2014, vol. 16, pp. 385-389.
- 6. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами / Д.А. Новиков М: ЛЕНАНД, 2022. 500 с
- 7. Виноградов Г.П. Моделирование поведения агента с учетом субъективных представлений о ситуации выбора / Г.П. Виноградов, В.Н. Кузнецов // Искусственный интеллект и принятие решений, 2011. № 3. С. 58-72.

- 8. Виноградов Г.П. Ментальные модели в проектировании поведения искусственных сущностей / Г.П. Виноградов, А.А. Прохоров // Программные продукты и системы, 2021. Т. 34. № 1. С. 197–206. DOI: 10.15827/0236-235X.133.197-206.
- 9. Gentner D., Stevens A.L. (Eds.). Mental Models. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 1983.
- 10. Johnson-Laird P.N. Mental Models: Towards a cognitive science of language, inference, and consciousness. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1983.
- 11. Holland J.H., Holyoak K.J., Nisbett R.E., et al. Induction: Processes of inference, learning, and discovery. Cambridge, MA: MIT Press, 1986.
- 12. Schumacher R.M., Czerwinski M.P. Mental models and the acquisition of expert knowledge. In: R.R. Hoffman (Ed.), The Psychology of expertise: cognitive research and empirical AI. New York: Springer-Verlag, 1992, pp. 61-79, DOI: 10.1007/978-1-4613-9733-5\_4.
- 13. Заде Л.А. Основы нового подхода к анализу сложных процессов принятия решений / Л.А. Заде. // Математика сегодня. М.: Знание, 1978. С. 5-40.
- 14. Новиков Д.А. Математические модели формирования и функционирования команд / Д.А. Новиков. М.: Физматлит, 2008.
- 15. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л.А. Заде. М.: Мир, 1976.
- 16. Бочарников В.П. Fuzzy-технология: Математические основы. Практика моделирования в экономике / В.П. Бочарников. СПб.: Наука, 2000. 328 с.

Виноградов Геннадий Павлович. Д.т.н., профессор, профессор Тверского государственного технического университета, заведующий лабораторией НИИ Центрпрограммсистем, член Российской ассоциации искусственного интеллекта, член Российской ассоциации нечетких систем и мягких вычислений. Основные направления научной деятельности: искусственный интеллект, принятие решений, многоагентные системы. AuthorID:149735, SPIN: 7288-4042, ORCID 0000-0001-5757-2753, Scopus AuthorID:23976986500, wgp272ng@mail.ru. 170024, Россия, г. Тверь, ул. Республиканская, д.11, кВ. 130

UDC 519.876.2

DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.011

### Modeling agent representations in an intelligent organization

### Gennady P. Vinogradov

Research Institute CENTERPROGRAMSYSTEM,

Russia, Tver, wgp272ng@mail.ru

**Abstract.** Relevance. The joint work of intelligent agents within an organization makes it relevant to research on the development of methods for coordinating the perception of a situation of purposeful state, goals, interests, values, norms and the creation of common ideas about the situation of choice. The purpose of the work. Using the principle of parallel perception, we propose an approach and a model for coordinating perception and ideas about the choice situation. This ensures: a) expanding the range of approaches in shaping strategies and tactics for the evolution of the organizational system; b) early detection and understanding of trends and the formation of a coherent vision of the future; d) a basis for experimentation and anticipation of new ideas; e) building capacity for self-development; f) strengthening and developing the intellectual capital of the organization; h) a coherent view of the problems. The methods of the theory of fuzzy sets, the theory of active systems, the theory of fuzzy models and networks are used. The main results. The concept of a subjective view of a subject area is introduced. It is proposed to use a fuzzy product model to formalize the ideas. The paper describes the structure of representations and one of the options for its adaptation. The methods of evaluating the usefulness of the representation model and its formalization are considered. An approach based on the hypothesis of common goals and interests of the personnel (agents) of the system is proposed to describe the organization's learning model. The validity of this hypothesis follows from the obvious fact that in an organization, due to the division of labor, the result of each depends on the joint efforts of all. Consequently, the individual contributions of agents based on insight, intuition, knowledge, experience, and available information of a particular agent with differing values, norms, beliefs, goal structures, and abilities, when they come together to do some work, determine the future outcome.

Keywords: model, intelligent agent, pattern, knowledge, adaptation

#### References

- 1. Rubinshteyn M.F., Firstenberg A.R. Intellektual'naya organizatsiya: Privnesi budushcheye v nastoyashcheye i prevrati tvorcheskiye idei v biznes-resheniya [The Intelligent Organization: Bringing the Future to the Present and Turn Creative Ideas into Business Solutions]. Moscow, INFRA-M Publ., 2003, 190 p.
- 2. Vinogradov G.P., Konyukhov I.A. Patterns in Smart Wireless Sensor Network Nodes. International Scientific Conference "Information Technologies for Industry" (IITI'22). Lecture Notes in Networks and Systems. Springer Nature Switzerland AG, 2022, pp. 73–82.
- 3. Winkler M., Tuchs K.-D., Hughes K., Barclay G. Theoretical and practical aspects of military wireless sensor networks. Journal of Telecommunications and Information Technology, 2008, no. 2, pp. 37-45.
- 4. Larionova N.I., Varlamova Yu.A., Odintsova Yu.L., Kabasheva I.A. Povedencheskaya i eksperimental'naya ekonomika: uchebnoye posobiye [Behavioral and Experimental Economics: Textbook]. Kazan, Izdatel'stvo Kazanskogo universiteta [Kazan University Publishing House] Publ., 2022, 112 p.
- 5. Mikusz M. Towards an understanding of cyber-physical systems as industrial software-product-service systems. Procedia CIRP, 2014, vol. 16, pp. 385-389.
- 6. Novikov D.A. Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami [Theory of Management of Organizational Systems]. Moscow, LENAND Publ., 2022, 500 p.
- 7. Vinogradov G.P., Kuznetsov V.N. Modelirovaniye povedeniya agenta s uchetom sub"yektivnykh predstavleniy o situatsii vybora [Modeling agent behavior taking into account subjective perceptions of the choice situation]. Iskusstvennyy intellekt i prinyatiye resheniy [Artificial Intelligence and Decision Making], 2011, no. 3, pp. 58-72.
- 8. Vinogradov G.P., Prokhorov A.A. Mental'nyye modeli v proektirovanii povedeniya iskusstvennykh sushchnostey [Mental models in the design of artificial entities behavior]. Programmnoye produkty i sistemy [Software & Systems], 2021, vol. 34, no. 1, pp. 197–206. DOI: 10.15827/0236-235X.133.197-206.
- 9. Gentner D., Stevens A.L. (Eds.). Mental Models. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 1983.
- 10. Johnson-Laird P.N. Mental Models: Towards a cognitive science of language, inference, and consciousness. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1983.
- 11. Holland J.H., Holyoak K.J., Nisbett R.E., et al. Induction: Processes of inference, learning, and discovery. Cambridge, MA: MIT Press, 1986.
- 12. Schumacher R.M., Czerwinski M.P. Mental models and the acquisition of expert knowledge. In: R.R. Hoffman (Ed.), The Psychology of expertise: cognitive research and empirical AI, New York: Springer-Verlag, 1992, pp. 61-79, DOI: 10.1007/978-1-4613-9733-5\_4.
- 13. Zade L.A. Osnovy novogo podkhoda k analizu slozhnykh protsessov prinyatiya resheniy [Foundations of a new approach to the analysis of complex decision-making processes]. Matematika segodnya [Mathematics today]. Moscow, Znaniye Publ., 1978, pp. 5-40.
- 14. Novikov D.A. Matematicheskiye modeli formirovaniya i funktsionirovaniya komand [Mathematical models of team formation and functioning]. Moscow, Fizmatlit [Physmatlit] Publ., 2008.
- 15. Zade L.A. Ponyatiye lingvisticheskoy peremennoy i yego primeneniye k prinyatiyu priblizhennykh resheniy [The Concept of a linguistic variable and its application to approximate decision making]. Moscow, Mir Publ., 1976.
- 16. Bocharnikov V.P. Fuzzy-tekhnologiya: Matematicheskiye osnovy. Praktika modelirovaniya v ekonomike [Fuzzy technology: Mathematical foundations. Practice of modeling in economics]. Saint Petersburg, Nauka [Science] Publ., 2000, 328 p.

Vinogradov Gennady Pavlovich. Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Tver State Technical University, Head of the laboratory of the Research Institute CENTERPROGRAMSYSTEM, member of the Russian Association of Artificial Intelligence, member of the Russian Association of Fuzzy Systems and Soft Computing. Main areas of scientific activity: artificial intelligence, decision-making, multi-agent systems. AuthorID:149735, SPIN: 7288-4042, ORCID 0000-0001-5757-2753, Scopus AuthorID:23976986500, wgp272ng@mail.ru, 170024, Russia, Tver, Republikanskaya str., 11, sq. 130

Статья поступила в редакцию 09.04.2025; одобрена после рецензирования 13.11.2025; принята к публикации 14.11.2025.

The article was submitted 04/09/2025; approved after reviewing 11/13/2025; accepted for publication 11/14/2025.

УДК 519.833

DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.012

## Исследование влияния беспилотных автомобилей на динамику выбора между индивидуальным и общественным транспортом

Быков Никита Валерьевич<sup>1,2</sup>, Костров Максим Алексеевич<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Российский университет транспорта (РУТ-МИИТ), Россия, Москва, bykov@bmstu.ru <sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, Москва

Аннотация. В работе исследуются социальные дилеммы, возникающие при внедрении беспилотных автомобильных транспортных средств в гетерогенный транспортный поток, включающий индивидуальные транспортные средства и автобусы. Для анализа используется модель транспортного потока на основе клеточных автоматов Revised S-NFS, позволяющая выявлять эффекты взаимодействия различных типов агентов. Критерием наличия социальной дилеммы выступает дефицит социальной функции, связанный с расхождением между равновесием Нэша и оптимальным по Парето распределением стратегий. Рассмотрены сценарии с различной долей беспилотных транспортных средств и начальными плотностями потока. Показано, что в системе могут реализовываться дилемма «заключённого» и дилемма «ястребы и голуби» между автобусами и другими видами транспорта, тогда как для беспилотных транспортных средств характерно устойчивое преимущество в скорости, приводящее к исчезновению социальных дилемм при их доминировании в потоке. Полученные результаты расширяют представления о влиянии БАТС на динамику выбора транспортного средства и могут служить основой для разработки транспортной политики, учитывающей конфликт индивидуальных и общественных интересов.

**Ключевые слова:** беспилотный транспорт, клеточные автоматы, социальные дилеммы, автобусы, кооперативное поведение, теория игр, транспортный поток

**Цитирование:** Быков Н.В. Исследование влияния беспилотных автомобилей на динамику выбора между индивидуальным и общественным транспортом / Н.В. Быков, М.А Костров // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. − № 4(40). − C.151-163. − DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.012.

Введение. Беспилотные автомобильные транспортные средства (БАТС) постепенно внедряются в существующие транспортные потоки. Так, компания Tesla запустила сервис такси с беспилотными автомобилями в США. Отечественные компании Navio, Яндекс и др. также ведут разработки в области беспилотных автомобилей и тестируют их на дорогах общего пользования. Главным преимуществом БАТС является возможность синхронизации их между собой и образование кластеров (в англ. platoon) — синхронизированных колонн из БАТС, передвигающихся с одной скоростью благодаря обмену информации через соответствующие протоколы [1-3]. С совершенствованием систем управления и накоплением опыта эксплуатации доля БАТС на дорогах общего пользования будет только нарастать. Поэтому проблема исследования влияния БАТС на транспортные потоки в настоящее время широко исследуется в мире [4, 5].

В связи с начальным этапом внедрения БАТС в транспортные потоки и, как следствие, невозможности широкомасштабных экспериментальных исследований, основным инструментом исследования является математическое и компьютерное моделирование. Модели транспортных потоков разделяют на модели макро- и микроуровня (иногда выделяют также мезоуровень) [6]. Первые относительно просты, при этом их удобно использовать для изучения преимущественно гомогенных транспортных потоков [7-10]. Модели микроуровня описывают движение отдельных ТС, поэтому их часто используют при моделировании гетерогенных транспортных потоков [11-13]. Среди моделей микроуровня особо выделяются модели на основе клеточных автоматов (КА) [14-17], сочетчающие эффективность и простоту, а также хорошо согласующиеся с опытными данными.

Одной из острых проблем, порождаемых урбанизацией и ростом городского населения, является стимулирование людей использовать общественный транспорт вместо личного, что

позволяет существенно повысить пропускную способность имеющихся транспортных систем [7, 11, 12, 17, 18]. В работе [18] показано, что при выборе между традиционным личным и общественным транспортом возникают социальные дилеммы – ситуации, в которых сталкиваются личные и общественные интересы. Наличие социальной дилеммы в теоретикоигровой ситуации из N агентов определяется двумя необходимыми признаками [19]: существует стратегия, выбор которой приводит агента к достижению максимального выигрыша по крайней мере в одном из исходов, но выбор этой стратегии может негативно влиять на выигрыш других агентов; выбор данной стратегии всеми агентами ведёт к невыгодному исходу для всех участников взаимодействия. Такая стратегия называется *D*стратегией (от англ. defector). При выборе транспорта возникают социальная дилемма заключенного для N игроков, а в случае выделенной полосы — дилемма труса для N игроков. В работах [20, 21] показано возникновение социальных дилемм в гетерогенном потоке из традиционных (управляемых человеком) и беспилотных транспортных средств. Исследование и понимание социальных дилемм открывает возможности для управления выбором для стимулирования механизмов кооперативного поведения и позволяет не только глубже понять механизмы организации транспортных систем, но и сформулировать практические рекомендации ДЛЯ транспортной политики, ориентированные гармоничное сосуществование различных групп населения.

Целью настоящей работы является исследование социальных дилемм, возникающих при обобщении ситуаций, описанных в работах [18, 20], т. е. при наличии в потоке трёх типов агентов: управляемых человеком индивидуальных транспортных средств (ИТС), автобусов и БАТС. Постановка трехсторонней игровой задачи является весьма специфической и может быть проанализирована в основном в частных случаях, когда взаимодействие может быть разбито на парный выбор, поэтому сама по себе представляет определенный интерес. При этом мы покажем, что масштабное внедрение БАТС вообще устраняет социальную дилемму выбора между личным и общественным транспортном.

Необходимо отметить, что с точки зрения постановки задачи существенны лишь вместимость транспортного средства и тип его движения. Поэтому, например, нет никакой разницы, считать ли под ИТС только личные автомобили или же включать туда такси, которые управляются человеком-водителем; точно так же нет разницы между личным БАТС и БАТСтакси: все эти средства перевозят одно и то же количество пассажиров и управляются либо человеком, либо являются беспилотными и только в этом состоит разница с точки зрения модели. При этом, практика моделирования и предварительные результаты показывают, что в гетерогенном потоке БАТС не обладают существенными преимуществами в скоростях до момента, пока их доля в потоке не станет превалирующей [2, 3,20,21]. Это связано с тем, что основное преимущество БАТС – образование кластеров – в смешанном потоке реализуется довольно ограничено. С точки зрения задачи выбора транспорта в этом случае наиболее интересна ситуация, когда БАТС предоставлено некоторое имманентное преимущество, которое может быть реализовано за счет возможности использовать выделенную полосу для автобусов, плотность которых намного меньше обычных транспортных средств и поэтому на ней можно образовывать кластеры.

1. Модель движения. В модели три класса транспортных средств (ТС): ИТС, автобусы и БАТС. Для описания движения в полосе используется модифицированная модель на клеточных автоматах Revised S-NFS [18, 20-22]. Для моделирования перестроений ИТС и БАТС используется модифицированная модель Кукиды [20, 23]. Выбор этих моделей обусловлен их широким распространением, способностью воспроизводить экспериментальные данные и учетом теории трех фаз Кернера [22, 24]. Время и пространство в модели дискретно. Многополосная дорога представляет собой набор клеток на плоскости.

Ширина одной полосы равна одной клетке. При этом ИТС и БАТС занимают одну клетку, а автобус — две. Классическая интерпретация предполагает длину клетки в 7,5 метров и временной шаг в 1 секунду [14]. Таким образом, если  $v_{\rm max} = 5$ , можно моделировать диапазон скоростей от 0 до 135 км/ч с шагом в 27 км/ч. Длина автобуса также находится в согласии с принятыми нормами [19]. Топология транспортной сети принимается замкнутой круговой, как это принято в исследованиях задач динамики транспорта [1, 14-26].

- **1.1.** Движение по полосе. Движение ИТС и автобусов подчиняется следующим правилам, которые применяются параллельно ко всем агентам в системе при переходе от одного шага по времени к следующему [22]:
  - 1) ускорение: если  $g_i > G$  или  $v_i^{(0)} < v_{i+1}^{(0)}$ , тогда:

$$v_i^{(1)} = \min \{ v_{\text{max}}, v_i^{(0)} + 1 \},$$

где  $v_i^{(0)}$ — скорость i-го TC в начале временного шага,  $v_{i+1}^{(0)}$ — скорость следующего TC по направлению движения на текущей полосе,  $g_i$  — расстояние (число незанятых клеток) между этими TC, G — расстояние синхронизации, а  $v_{\rm max}$  — максимальная скорость TC.

2) медленный старт (применяется с вероятностью q):

$$v_i^{(2)} = \min \left\{ v_i^{(1)}, x_{i+s_i}(t-1) - x_i(t-1) - s_i \right\},\,$$

где  $s_i = S$  с вероятностью r и  $s_i = 1$  с вероятностью 1 - r.

3) быстрый старт:

$$v_i^{(3)} = \min \left\{ v_i^{(2)}, x_{i+s_i}(t) - x_i(t) - s_i \right\},$$

4) случайное торможение (с вероятностью  $1 - p_i$ ):

$$v_i^{(4)} = \max\left\{1, v_i^{(3)} - 1\right\},\,$$

где  $p_i$  определяется следующим образом:

$$p_i = \begin{cases} P_1, & \text{если } g_i > G, \\ P_2, & \text{если } \mathbf{v}_i^{(0)} < \mathbf{v}_{i+1}^{(0)}, \\ P_3, & \text{если } \mathbf{v}_i^{(0)} = \mathbf{v}_{i+1}^{(0)}, \\ P_4, & \text{если } \mathbf{v}_i^{(0)} > \mathbf{v}_{i+1}^{(0)}. \end{cases}$$

5) избегание столкновения:

$$v_i^{(5)} = \min \{v_i, g_i(t) + v_i^{(4)}\}.$$

6) движение вперед:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i^{(5)}$$
,

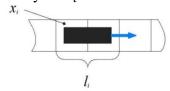
где  $x_i(t)$  — положение i-го TC в момент времени t; начальная скорость на текущем шаге  $v_i^{(0)}$ равняется скорости  $v_i^{(5)}$  с предыдущего шага:

$$v_i^{(0)}(t) = v_i^{(5)}(t-1) = x_i(t) - x_i(t-1)$$
.

Для автобусов, которые занимают две клетки, позицией считается клетка, последняя относительно направления движения (рис. 1), тогда:

$$g_i = x_{i+1}^t - x_i^t - l_i,$$

где  $l_i$  – длина ТС (в клетках); для автобусов  $l_i=2$ .



**Рис. 1**. К определению текущей позиции ТС  $x_i$ 

В модели имеется 8 свободных параметров (G, q, r, S,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$ ), значения которых выбраны в соответствии с принятыми нормами [19, 21–23]:

$$G = 15, q = 0.99, r = 0.99, S = 2, P_1 = 0.99, P_2 = 0.99, P_3 = 0.98, P_4 = 0.01.$$

Движение БАТС в полосе подчиняется следующим правилам [21]:

1) адаптивный круиз-контроль (АКК) (в случае, если с движущимся впереди ТС невозможно обмениваться информацией и выстроить кластер, например, управляемое человеком ТС):

– если 
$$v_i^{(0)} = 0$$
, то:

$$v_i^{(1)} = egin{cases} v_i^{(0)}, & \text{если} & g_i = 0, \\ v_i^{(0)} + 1, & \text{если} & g_i \ge 1. \end{cases}$$

– если 
$$v_i^{(0)} \in \{1, 2, ..., v_{\max} - 1\}$$
, то:

$$v_i^{(1)} = \begin{cases} v_i^{(0)} - 1, & \text{если} \quad g_i \leq \text{GAP}_1, \\ v_i^{(0)}, & \text{если} \quad \text{GAP}_1 < g_i < \text{GAP}_2, \\ v_i^{(0)} + 1, & \text{если} \quad g_i \geq \text{GAP}_2, \end{cases}$$

где величины GAP<sub>1</sub> и GAP<sub>2</sub> определяются по табл. 1 [21].

**Таблица 1.** Определение величин GAP<sub>1</sub> и GAP<sub>2</sub>

$v_i^{(0)}$	GAP <sub>1</sub>	GAP <sub>2</sub>	$v_i^{(0)}$	GAP <sub>1</sub>	GAP <sub>2</sub>
0	-	1	3	6	8
1	0	4	4	8	10
2	4	6	5	-	10

$$-$$
 если  $v_i^{(0)} = v_{\text{max}}$ , то:

$$v_i^{(1)} = egin{cases} v_i^{(0)} - 1, & ext{если} & g_i \leq ext{gap}_{ ext{max}}^{ACC} = 10, \\ v_i^{(0)}, & ext{если} & g_i > ext{gap}_{ ext{max}}^{ACC} = 10. \end{cases}$$

2) избегание столкновения:

$$v_i^{(2)} = \min \{v_i, g_i(t) + v_i^{(1)}\}.$$

3) движение вперед:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i^{(2)}$$
.

В случае, если впереди движущееся ТС является также БАТС и с ним возможно образовать кластер посредством обмена информацией, то вместо правила 1 используется следующее правило кооперативного адаптивного круиз-контроля (КАКК):

- если 
$$v_i^{(0)} < v_{i+1}^{(1)}$$
, то:

$$v_i^{(1)} = \min \{v_{\text{max}}, v_i^{(0)} + 1\};$$

- если 
$$v_i^{(0)} = v_{i+1}^{(1)}$$
, то:

$$v_i^{(1)} = \begin{cases} v_{i+1}^{(1)}, & \text{if } g_i = 0, \\ v_{i+1}^{(1)} + 1, & \text{if } g_i \ge 1, \end{cases}$$

- если 
$$\left(v_i^{(0)}-v_{i+1}^{(1)}\right)\in\{1,2,...,v_{\max}\}$$
, то  $\operatorname{GAP}\in\{gp_1,...,gp_{\max}\}$  и

$$v_i^{(1)} = \begin{cases} v_i^{(0)} - 1, & \text{если} \quad g_i < \text{GAP,} \\ v_i^{(0)}, & \text{если} \quad g_i \ge \text{GAP.} \end{cases}$$

где  $gp_1 = 1$ ,  $gp_2 = 3$ ,  $gp_3 = 8$ ,  $gp_4 = 12$  и  $gp_5 = gp_{\text{max}} = 17$ . Эти значения определяются на основе простой физической оценки относительного тормозного пути двух последовательно идущих транспортных средств.

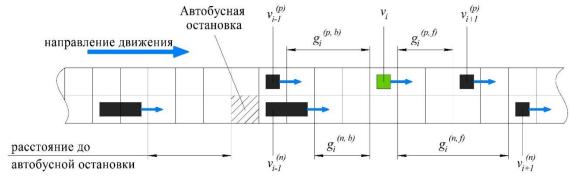
- **1.2. Перестроение и автобусные остановки.** Осуществлять перестроения между полосами движения могут ИТС и БАТС, автобусы не перестраиваются и всегда движутся по крайней правой полосе. Правила перестроения ИТС основаны на модели Кукиды [23], согласно которой решение о перестроении принимается на основании двух критериев:
  - стимулирующий критерий:

$$g_i^{(n,f)} + v_{i+1}^{(n)} > v_i \ge g_i^{(p,f)} + v_{i+1}^{(p)};$$

- критерий безопасности:

$$v_i > v_{i-1}^{(n)} - g_i^{(n,b)}$$
.

В случае выполнения обоих критериев, перестроение осуществляется с вероятностью  $P_{CL}=0.5$ . Рис. 2 поясняет применение критерия перестроения и введенные обозначения.



**Рис. 2.** К пояснению правил перестроения. Индексы относительно рассматриваемого TC (зеленое): p — текущая полоса, n — соседняя полоса, b — TC сзади относительно рассматриваемого, f — TC спереди относительно рассматриваемого

Автобусными остановками являются специально помеченные клетки (см. рис. 2), на которых каждый автобус должен остановиться на  $\tau$  шагов по времени. Список позиций остановок задается заранее и передается в модель. После истечения  $\tau$  шагов автобус продолжает движение.

В силу того, что БАТС могут передвигаться в двух режимах АКК/КАКК, стимулирующий критерий для них должен зависеть от текущего режима передвижения и от режима движения в соседней полосе. Поэтому стимулирующий критерий для БАТС состоит из двух этапов [20]:

- стимул к перестроению из текущей полосы:

KAKK: 
$$v_i \ge v_{i+1}^{(p)}$$
;

AKK: 
$$v_i + \text{GAP}_2 \ge g_i^{(p,f)} + v_{i+1}^{(p)};$$

- стимул к перестроению в соседнюю полосу:

KAKK: 
$$v_{i+1}^{(n)} > v_i$$
;

AKK: 
$$g_i^{(n,f)} + v_{i+1}^{(n)} > v_i + GAP_2$$
.

Стимулирующий критерий выполняется только при выполнении обоих этапов одновременно.

**1.3. Расчет макропараметров.** Пусть n — количество клеток в одной полосе; k — количество полос; s — число типов TC;  $N_i$  — количество TC i-ого типа,  $l_i$  — длина TC i-ого типа, где  $i \in [1, s]$ . В рассматриваемом случае представлены три вида TC — ИТС, БАТС и автобусы с длинами 1, 1 и 2 клетки соответственно.

Для замкнутой кольцевой дороги общее число TC в системе N сохраняется, тогда плотность TC  $\rho$ , их средняя скорость  $\langle v \rangle$ , а также плотность потока q определяются по формулам:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^{s} N_{i} I_{i}}{nk}; \qquad \langle v \rangle = \frac{1}{T_{e} N} \sum_{t=0}^{T_{e} - 1} \sum_{j=0}^{N-1} v_{j}(t); \qquad q = \frac{1}{T_{e} nk} \sum_{t=0}^{T_{e} - 1} \sum_{j=0}^{N-1} v_{j}(t).$$

С учетом разных длин ТС в данном случае под плотностью ТС понимается относительное число занятых клеток.

Средний поток агентов рассчитывается, как:

$$f = \frac{1}{nk} \sum_{i=1}^{s} M_i \langle v_i \rangle,$$

где  $\langle v_i \rangle$  – средняя скорость i-ого типа TC, а  $M_i$  – количество перевозимых этим видом TC агентов.

Расчет потока выполняется после достижения системой установившегося состояния в течение  $T_s$  шагов, после чего снятие показателей и их усреднение выполняется в течение  $T_e$  шагов по времени.

2. Социальные дилеммы. Рассматривается гетерогенный транспортный поток, состоящий из ИТС, БАТС и автобусов. С точки зрения классических социальных дилемм в системе присутствуют два класса агентов. Первый класс – кооператоры – придерживается кооперативной стратегии, которая в данном случае сводится к выбору общественного транспорта (автобусов), второй класс – дефекторы – придерживаются эгоистичной стратегии, сводящейся к выбору ИТС или БАТС. При этом число типов агентов в системе равно трем (пассажиры автобусов, ИТС и БАТС). Функцией награды каждого агента является средняя скорость, а социальной функцией f является поток всех агентов в системе [18-21, 26], который характеризует пропускную способность дороги с точки зрения пассажиров. Важно отметить, что агентом является конкретный пассажир или водитель, а не транспортное средство. Мерой социальной дилеммы является величина дефицита социальной функции  $\Delta S$  [27], представляющего собой нормированную разницу между максимальным значением социальной функции  $f_{\text{max}}$  и значением в точке, соответствующей равновесию Нэша  $f_{\text{NE}}$ :

$$\Delta S = \frac{f_{\text{max}} - f_{NE}}{f_{\text{max}}}.$$

Положительное значение  $\Delta S$  указывает на наличие социальной дилеммы, значение  $\Delta S=0$  указывает на отсутствие дилеммы. Максимум социальной функции соответствует оптимальному по Парето решению, а равновесие по Нэшу отражает самосогласованное распределение стратегий, при котором ни у одного отдельного агента нет стимула к одностороннему отклонению, даже если коллективный результат не оптимален.

**2.1.** Параметры модели. Моделируемая система представляет собой круговую трехполосную дорогу с равномерно установленными вдоль нее автобусными остановками. Параметры:  $n=1000,\ k=3,\ T_e=2000,\ v_{\rm max}=3,\ \tau=20,\ \Delta=0,01,\ {\rm гдe}\ \Delta$  — среднее число остановок, приходящихся на одну клетку. При этом рассматривается следующий случай: автобусы движутся только по выделенной для них полосе, а у БАТС есть возможность заезжать на эту полосу.

Вместимость автобусов  $C_b=50$  пассажиров, вместимость ИТС и БАТС равна единице. Таким образом, количество дефекторов равно сумме ИТС и БАТС. Количество автобусов  $N_b$  выбирается так, чтобы их хватило для перевозки всех пассажиров в текущем сценарии моделирования:

$$N_b = \left\lceil \frac{N_C}{C_b} \right\rceil + 1,$$

где [a] – целая часть числа a.

Для каждого моделируемого случая общее число агентов в системе остается постоянным, варьируется доля кооператоров в общем числе агентов и доля БАТС.

На рис. 3 и 4 представлены фундаментальные диаграммы (зависимость плотности потока TC q от их плотности  $\rho$ ), показывающие влияние автобусов и БАТС на поток из ИТС, где  $\alpha = N_b/N$  – доля автобусов в общем числе TC, а R – доля БАТС в числе TC. Видно, что увеличение доли автобусов приводит к изменению состояния ИТС на фундаментальной диаграмме в сторону снижения потока (рис. 3). В то же время увеличение доли БАТС приводит к увеличению потока (рис. 4).

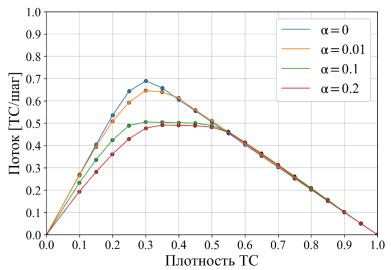


Рис. 3. Фундаментальная диаграмма при различной доле автобусов в потоке ИТС

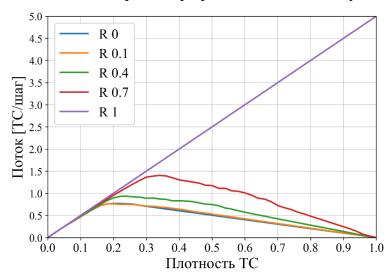
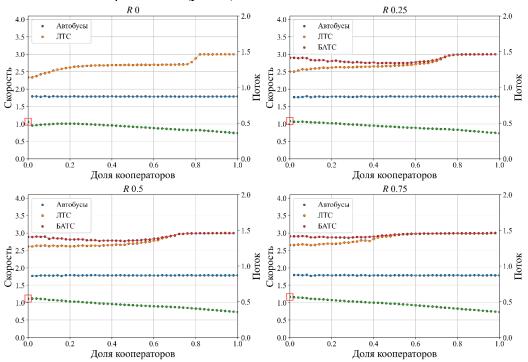


Рис. 4. Фундаментальная диаграмма при различной доле БАТС в потоке ИТС

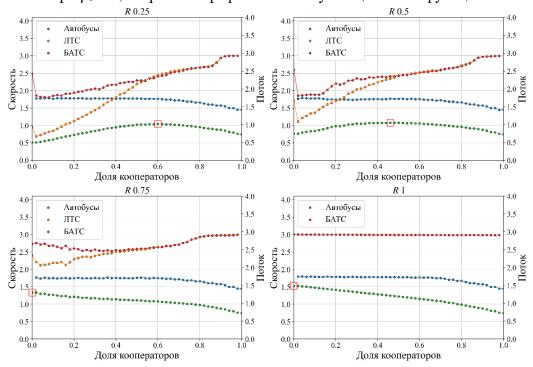
Плотность TC  $\rho_0$ , соответствующая нулевой доле кооператоров, называется начальной. C увеличением количества кооператоров увеличивается и количество автобусов, поэтому количество личных транспортных средств и БАТС уменьшается, а, следовательно, реальная плотность TC падает.

**2.2. Анализ результатов.** На рис. 5-7 представлены зависимости средних скоростей агентов в автобусах, ИТС и БАТС, а также общего потока агентов f от доли кооператоров в общем числе агентов при разных долях БАТС R для различных начальных плотностей ТС  $\rho_0$ . При наличии выделенной

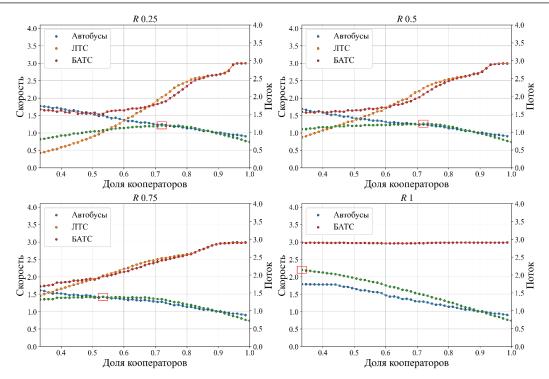
автобусной полосы максимально возможная начальная плотность составляет 0,66, т. к. личными ТС могут быть загружены только 2 из 3 полос. Отдельно рассмотрен случай, когда изначально на полосе присутствуют автобусы (интерпретируется как перевозка пассажиров, не обладающих ИТС): 20% агентов изначально передвигаются на автобусе, а остальные 60% — на ИТС и могут выбирать между личным, общественным транспортом и БАТС. Начальная плотность такого потока  $\rho_0 = 0,608$  (рис. 7).



**Рис. 5.** Зависимость средней скорости для каждого типа агентов и потока всех агентов (зеленый график) от доли кооператоров в общем числе агентов для различных долей БАТС R при  $\rho_0 = 0,2$ . Красный график — максимум социальной функции



**Рис. 6.** Зависимость средней скорости для каждого типа агентов и потока всех агентов (зеленый график) от доли кооператоров в общем числе агентов для различных долей БАТС R при  $\rho_0$ =0.5. Красный квадрат — максимум социальной функции



**Рис. 7.** Зависимость средней скорости для каждого типа агентов и потока всех агентов (зеленый график) от доли кооператоров в общем числе агентов для различных долей БАТС R при  $\rho_0$ =0.608. Красный квадрат — максимум социальной функции

При небольших начальных плотностях, соответствующих свободному потоку ( $\rho_0 = 0.2$ ), социальная дилемма между общественным и личным транспортом отсутствует в силу того, что максимуму социальной функции соответствует нулевое значение доли кооператоров. При этом БАТС более привлекательны для передвижения, чем ИТС, т. к. используют выделенную полосу, получая преимущество в скорости. В отсутствие автобусов полоса становится выделенной для БАТС, поэтому такой транспортный поток стремится в состояние с долей БАТС 100%. При этом максимуму социальной функции и равновесию Нэша соответствует одно и тоже значение доли кооператоров – 0, а значит  $\Delta S = 0$  и дилемма отсутствует.

Для средних начальных плотностей ( $\rho_0 = 0.5$ , рис. 6) между автобусами и БАТС имеет место дилемма заключенного, т. к. средняя скорость автобусов всегда меньше средней скорости БАТС, а значит равновесие Нэша для этой пары ТС будет иметь место при нулевой доле кооператоров. В то же время между ИТС и автобусами возникает другая социальная дилемма: наблюдается точка пересечения значений средних скоростей кооператоров и дефекторов на ИТС. Увеличение доли кооператоров относительно этой точки делает стратегию дефекторов выигрышной, а уменьшение делает выигрышной стратегию кооператоров, поэтому точка пересечения — это равновесие Нэша и т.к.  $\Delta S > 0$  имеет место дилемма типа «ястребы и голуби» (англ. *chicken game*). Обе эти дилеммы вырождаются при увеличении доли БАТС. Как и в предыдущем случае, БАТС более привлекательны для передвижения, чем обычные ТС, т. к. занимают выделенную полосу, что хорошо заметно по скачкам скорости на рис. 6 при нулевой доле кооператоров. Таким образом, из любого состояния транспортный поток стремится в равновесное состояние со 100% долей БАТС.

Для случаев, когда на выделенной полосе изначально присутствуют автобусы, имеет место дилемма «ястребы и голуби», как между БАТС и автобусами, так и между автобусами и ИТС. При малых долях кооператоров ИТС проигрывают в скорости остальным видам ТС. В связи с этим у агентов, передвигающихся на ИТС, будет мотивация пересесть на автобус или БАТС. При выборе в пользу автобуса с увеличением доли кооператоров будет достигнуто состояние равновесия между ИТС и автобусами, однако скорость БАТС будет больше.

Поэтому у агентов будет мотивация пересаживаться на БАТС (т. е. доля БАТС будет нарастать, пока не достигнет 100%) – именно такое состояние является равновесным.

Заключение. В работе проведено исследование социальных дилемм, возникающих при совместном движении индивидуальных транспортных средств, автобусов и беспилотных автомобилей в гетерогенном транспортном потоке. Использование модели Revised S-NFS на клеточных автоматах позволило воспроизвести динамику взаимодействия различных типов агентов и выявить ситуации, в которых проявляются конфликты между индивидуальной выгодой и коллективными интересами.

Показано, что при невысоких начальных плотностях транспортного потока социальные дилеммы практически не проявляются, а доминирующей стратегией становится использование индивидуального транспорта или БАТС. С ростом плотности движения формируются дилеммы заключённого и типа «ястребы и голуби» между автобусами и остальными видами транспортных средств. Беспилотные автомобили в силу возможности использовать выделенную полосу и формировать кластеры демонстрируют устойчивое преимущество по средней скорости, благодаря чему с увеличением их доли социальные дилеммы вырождаются, и система стремится к равновесию с полной доминацией БАТС.

Полученные результаты расширяют представления о закономерностях самоорганизации смешанных транспортных потоков и подчёркивают, что внедрение БАТС способно принципиально изменить структуру социальных взаимодействий при выборе вида транспорта. Это открывает возможности для разработки транспортной политики, направленной на баланс интересов различных групп участников движения и стимулирование кооперативного поведения.

Следует отметить ряд ограничений проведённого исследования. Во-первых, модель рассматривала замкнутую трёхполосную дорогу, что упрощает реальные условия городской улично-дорожной сети. Во-вторых, в анализе не учитывались факторы стоимости поездки, времени ожидания, различия в вместимости и комфорте транспортных средств, которые могут существенно влиять на выбор пассажиров. В-третьих, поведение агентов моделировалось в предположении рационального выбора стратегий, тогда как в реальности возможны иррациональные или стохастические решения. Эти допущения ограничивают прямую применимость результатов, однако позволяют выявить фундаментальные закономерности, лежащие в основе возникновения социальных дилемм в транспортных системах.

В дальнейшем целесообразно развивать исследования в двух направлениях: (1) включение дополнительных факторов — различие вместимости и стоимости поездки, приоритетные транспортные средства, динамическое распределение потоков; (2) переход от моделирования замкнутых систем к анализу реальных городских сетей, что позволит уточнить влияние БАТС на функционирование общественного транспорта и поведение пассажиров в условиях городской мобильности.

**Благодарности.** Исследование выполнено за счет бюджетного финансирования в рамках работ по проведению прикладных научных исследований по государственному заданию от 20.03.2025 № 103-00001-25-02 (шифр 4).

#### Список источников

- 1. Быков Н.В. Моделирование кластерного движения беспилотных транспортных средств в гетерогенном транспортном потоке/ Н.В. Быков // Компьютерные исследования и моделирование, 2022. Т. 14. № 5. с. 1041-1058.
- 2. Wu X., Postorino M.N., Mantecchini L. Impacts of connected autonomous vehicle platoon breakdown on highway. Physica A: statistical mechanics and its applications, 2024, vol. 650, pp. 130005, DOI: 10.1016/j.physa.2024.130005.
- 3. Yao Z., Wu Y., Wang Y., et al. Analysis of the impact of maximum platoon size of CAVs on mixed traffic flow: An analytical and simulation method. Transportation research part C: emerging technologies, 2023, vol. 147, pp. 103989, DOI: 10.1016/j.trc.2022.103989.

- 4. Uzzaman A., Islam M., Hossain S. Testing Autonomous vehicles in virtual environments: a review of simulation tools and techniques. Control systems and optimization letters, 2025, vol. 3, no. 2, pp. 2985-6116, DOI:10.59247/csol.v3i2.196.
- 5. Yang Y., Negash N.M., Yang J. Recent advances in interactive driving of autonomous vehicles: comprehensive review of approaches. Automotive Innovation, 2025, vol. 8, pp. 304-334, DOI:10.1007/s42154-024-00332-w.
- 6. Bellomo N., Dogde C. On the modeling of traffic and crowds: a survey of models, speculations, and perspectives. SIAM Review. 2011, vol.53, no.3, pp.409-463, DOI:10.1137/090746677.
- 7. Gu W., Cassidy M. J., Li Y. Models of bus queueing at curbside stops. Transportation science, 2015, vol. 49, no. 2, pp. 204-212, DOI:10.1287/trsc.2014.0537.
- 8. Tang T.Q., Mei C.Q., Huang H.J. A Dynamic model of the two-route traffic flow. International conference on transportation engineering 2007, Reston, VA: American society of civil engineers, Jul. 2007, pp. 1843-1848.
- 9. Tang T. Continuum models for free-ways with two lanes and nu-merical tests. Chinese science bulletin., 2004, vol. 49, no. 19, p. 2097.
- 10. Gupta A.K., Katiyar V.K. Analyses of shock waves and jams in traffic flow. Journal of physics a mathematical and general, 2005, vol. 38, no. 19, pp. 4069-4083, DOI:10.1088/0305-4470/38/19/002.
- 11. Arasan V.T., Vedagiri P. Simulating heterogeneous traffic flow on roads with and without bus lanes. Journal of infrastructure systems, 2009, vol. 15, no. 4, pp. 305-312, DOI:10.1061/(ASCE)1076-0342(2009)15:4(305).
- 12. Yang X., Si B., Huan M. Mixed traffic flow modeling near Chinese bus stops and its applications Journal of Central South University, 2012, vol. 19, no. 9, pp. 2697-2704
- 13. Fernández R. Modelling public transport stops by microscopic simulation. Transportation research part C emerging technologies, 2010, vol. 18, no. 6, pp. 856-868, DOI:10.1016/j.trc.2010.02.002.
- 14. Nagel K., Schreckenberg M. A cellular automaton model for freeway traffic. Journal de Physique I, 1992, v. 2, no. 12, pp. 2221–2229, DOI:10.1051/jp1:1992277.
- 15. Maerivoet S. De Moor B. Cellular automata models of road traffic. Physics reports, 2005, vol. 419, no. 1, pp. 1-64, DOI:10.1016/j.physrep.2005.08.005.
- 16. Zhang W.-W., Jiang R., Yuan Y.-M., et al. Traffic dynamics in a two-lane mixed traffic system: effect of four lane changing regulations. International journal of modern physics C, 2008, vol. 19, no. 11, pp. 1705-1715, DOI:10.1142/S0129183108013230.
- 17. Zhao X.M., Gao Z.Y., Jia B. The capacity drop caused by the combined effect of the intersection and the bus stop in a CA model. Physica A: statistical mechanics and its applications, 2007, vol. 385, no. 2, pp. 645-658, DOI:10.1016/j.physa.2007.07.040.
- 18. Bykov N.V., Kostrov M.A. Social dilemmas in a mixed traffic flow of buses and personal vehicles in transport mode choice. Physica A: statistical mechanics and its applications, 2024, vol. 647, p. 129873, DOI: 10.1016/j.physa.2024.129873.
- 19. Tanimoto J. Evolutionary games with sociophysics: analysis of traffic flow and epidemics. Springer, 2018, DOI:10.1007/978-981-13-2769-8.
- 20. Bykov N.V., Kostrov M.A. Lane-changing strategies of autonomous vehicles and social dilemmas in mixed traffic: A simulation study. Physica A: statistical mechanics and its applications, 2025, vol. 677, 130909, DOI:10.1016/j.physa.2025.130909.
- 21. Tanimoto J., Futamata M., Tanaka M. Automated vehicle control systems need to solve social dilemmas to be disseminated. Chaos, Solitons & Fractals, 2020, vol. 138, 109861, DOI:10.1016/j.chaos.2020.109861.
- 22. Kokubo S , Tanimoto J , Hagishima A. A new cellular automata Model including a decelerating damping effect to reproduce Kerner's three-phase theory. Physica A statistical mechanics and its applications, 2011, vol. 390, pp. 561-568, DOI:10.1016/j.physa.2010.10.027.
- 23. Kukida S., Tanimoto J., Hagishima A. Analysis of the influence of lane changing on traffic-flow dynamics based on the cellular automaton model. International journal of modern physics C, 2011, vol. 22, no. 03, pp. 271-281, DOI:10.1142/S012918311101621X.
- 24. Kerner B. The physics of traffic. Empirical freeway pattern features, engineering applications, and theory. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004.
- 25. Simão R., Wardil L. Social dilemma in traffic with heterogeneous drivers. Physica A statistical mechanics and its applications, 2021, vol. 561, pp. 125235, DOI:10.1016/j.physa.2020.125235.
- 26. Sueyoshi F., Utsumi S., Tanimoto J. Underlying social dilemmas in mixed traffic flow with lane changes. Chaos, Solitons & Fractals, 2022, vol. 155, p. 111790, DOI:10.1016/j.chaos.2022.111790.
- 27. Arefin M.R., Kabir K.M.A., Jusup M., et al. Social efficiency deficit deciphers social dilemmas. Scientific Reports, 2020, v. 10, no. 1, pp. 1-9, DOI:10.1038/s41598-020-72971-y.

**Быков Никита Валерьевич.** Доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Физика», начальник научно-исследовательского центра «Социофизика транспортных систем» Российского университета транспорта (РУТ-МИИТ), профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана. Author ID: 620361, SPIN: 8216-

2987, ORCID: 0000-0002-1930-6996, bykov@bmstu.ru. 127994, Россия, г. Москва, ул Образцова, д. 9, стр. 9 РУТ (МИИТ).

**Костров Максим Алексеевич.** Аспирант, младший научный сотрудник научно-исследовательского центра «Социофизика транспортных систем» кафедры «Физика» РУТ (МИИТ). AuthorID: 1228130, SPIN: 9289-7910, ORCID: 0009-0006-8675-1236, maks.kostrow@yandex.ru. 127994, Россия, г. Москва, ул Образцова, д. 9, стр. 9 РУТ (МИИТ).

UDC 519.833

DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.012

# Impact of autonomous vehicles on transport mode choice between personal vehicles and public transport

Nikita V. Bykov<sup>1,2</sup>, Maksim A. Kostrov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Russian University of Transport (RUT-MIIT), Russia, Moscow, bykov@bmstu.ru

Abstract. This study examines social dilemmas arising from the introduction of autonomous vehicles (AVs) into a heterogeneous traffic flow that includes human-driven personal vehicles and buses. The analysis employs a traffic flow model based on the Revised S-NFS cellular automaton, which captures the interaction effects among different types of agents. The presence of a social dilemma is identified through the Social Efficiency Deficit, defined as the gap between the Nash equilibrium and the Pareto-optimal distribution of strategies. Several scenarios with varying AV penetration rates and initial traffic densities are considered. The results demonstrate that both the prisoner's dilemma and the hawk—dove game may emerge between buses and other vehicle types, while AVs consistently exhibit a stable speed advantage, leading to the disappearance of social dilemmas once they dominate the flow. These findings enhance the understanding of how AVs affect transport mode choice dynamics and provide a basis for shaping transport policies that account for the conflict between individual and collective interests.

**Keywords:** automated vehicles, cellular automata, social dilemma, buses, cooperative behavior, game theory, traffic flow

**Acknowledgements:** This study was funded by the state budget as part of applied research carried out under the State Assignment dated March 20, 2025, No. 103-00001-25-02 (code 4).

#### References

- 1. Bykov N.V. Modelirovaniye klasternogo dvizheniya bespilotnykh transportnykh sredstv v geterogennom transportnom potoke [A simulation model of connected automated vehicles platoon dynamics in a heterogeneous traffic flow]. Komp'yuternyye issledovaniya i modelirovaniye [Computer research and modelling], 2022, vol. 14, no. 5, pp. 1041-1058
- 2. Wu X., Postorino M.N., Mantecchini L. Impacts of connected autonomous vehicle platoon breakdown on highway. Physica A: statistical mechanics and its applications, 2024, vol. 650, pp. 130005, DOI: 10.1016/j.physa.2024.130005.
- 3. Yao Z., Wu Y., Wang Y., et al. Analysis of the impact of maximum platoon size of CAVs on mixed traffic flow: An analytical and simulation method. Transportation research part C: emerging technologies, 2023, vol. 147, pp. 103989, DOI: 10.1016/j.trc.2022.103989.
- 4. Uzzaman A., Islam M., Hossain S. Testing Autonomous vehicles in virtual environments: a review of simulation tools and techniques. Control systems and optimization letters, 2025, vol. 3, no. 2, pp. 2985-6116, DOI:10.59247/csol.v3i2.196.
- 5. Yang Y., Negash N.M., Yang J. Recent advances in interactive driving of autonomous vehicles: comprehensive review of approaches. Automotive Innovation, 2025, vol. 8, pp. 304-334, DOI:10.1007/s42154-024-00332-w.
- 6. Bellomo N., Dogde C. On the modeling of traffic and crowds: a survey of models, speculations, and perspectives. SIAM Review. 2011, vol.53, no.3, pp.409-463, DOI:10.1137/090746677.
- 7. Gu W., Cassidy M. J., Li Y. Models of bus queueing at curbside stops. Transportation science, 2015, vol. 49, no. 2, pp. 204-212, DOI:10.1287/trsc.2014.0537.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Bauman Moscow state technical university, Russia, Moscow

- 8. Tang T.Q., Mei C.Q., Huang H.J. A Dynamic model of the two-route traffic flow. International conference on transportation engineering 2007, Reston, VA: American society of civil engineers, Jul. 2007, pp. 1843-1848.
- 9. Tang T. Continuum models for free-ways with two lanes and nu-merical tests. Chinese science bulletin., 2004, vol. 49, no. 19, p. 2097.
- 10. Gupta A.K., Katiyar V.K. Analyses of shock waves and jams in traffic flow. Journal of physics a mathematical and general, 2005, vol. 38, no. 19, pp. 4069-4083, DOI:10.1088/0305-4470/38/19/002.
- 11. Arasan V.T., Vedagiri P. Simulating heterogeneous traffic flow on roads with and without bus lanes. Journal of infrastructure systems, 2009, vol. 15, no. 4, pp. 305-312, DOI:10.1061/(ASCE)1076-0342(2009)15:4(305).
- 12. Yang X., Si B., Huan M. Mixed traffic flow modeling near Chinese bus stops and its applications Journal of Central South University, 2012, vol. 19, no. 9, pp. 2697-2704
- 13. Fernández R. Modelling public transport stops by microscopic simulation. Transportation research part C emerging technologies, 2010, vol. 18, no. 6, pp. 856-868, DOI:10.1016/j.trc.2010.02.002.
- 14. Nagel K., Schreckenberg M. A cellular automaton model for freeway traffic. Journal de Physique I, 1992, v. 2, no. 12, pp. 2221–2229, DOI:10.1051/jp1:1992277.
- 15. Maerivoet S. De Moor B. Cellular automata models of road traffic. Physics reports, 2005, vol. 419, no. 1, pp. 1-64, DOI:10.1016/j.physrep.2005.08.005.
- 16. Zhang W.-W., Jiang R., Yuan Y.-M., et al. Traffic dynamics in a two-lane mixed traffic system: effect of four lane changing regulations. International journal of modern physics C, 2008, vol. 19, no. 11, pp. 1705-1715, DOI:10.1142/S0129183108013230.
- 17. Zhao X.M., Gao Z.Y., Jia B. The capacity drop caused by the combined effect of the intersection and the bus stop in a CA model. Physica A: statistical mechanics and its applications, 2007, vol. 385, no. 2, pp. 645-658, DOI:10.1016/j.physa.2007.07.040.
- 18. Bykov N.V., Kostrov M.A. Social dilemmas in a mixed traffic flow of buses and personal vehicles in transport mode choice. Physica A: statistical mechanics and its applications, 2024, vol. 647, p. 129873, DOI: 10.1016/j.physa.2024.129873.
- 19. Tanimoto J. Evolutionary games with sociophysics: analysis of traffic flow and epidemics. Springer, 2018, DOI:10.1007/978-981-13-2769-8.
- 20. Bykov N.V., Kostrov M.A. Lane-changing strategies of autonomous vehicles and social dilemmas in mixed traffic: A simulation study. Physica A: statistical mechanics and its applications, 2025, vol. 677, 130909, DOI:10.1016/j.physa.2025.130909.
- 21. Tanimoto J., Futamata M., Tanaka M. Automated vehicle control systems need to solve social dilemmas to be disseminated. Chaos, Solitons & Fractals, 2020, vol. 138, 109861, DOI:10.1016/j.chaos.2020.109861.
- 22. Kokubo S, Tanimoto J, Hagishima A. A new cellular automata Model including a decelerating damping effect to reproduce Kerner's three-phase theory. Physica A statistical mechanics and its applications, 2011, vol. 390, pp. 561-568, DOI:10.1016/j.physa.2010.10.027.
- 23. Kukida S., Tanimoto J., Hagishima A. Analysis of the influence of lane changing on traffic-flow dynamics based on the cellular automaton model. International journal of modern physics C, 2011, vol. 22, no. 03, pp. 271-281, DOI:10.1142/S012918311101621X.
- 24. Kerner B. The physics of traffic. Empirical freeway pattern features, engineering applications, and theory. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004.
- 25. Simão R., Wardil L. Social dilemma in traffic with heterogeneous drivers. Physica A statistical mechanics and its applications, 2021, vol. 561, pp. 125235, DOI:10.1016/j.physa.2020.125235.
- 26. Sueyoshi F., Utsumi S., Tanimoto J. Underlying social dilemmas in mixed traffic flow with lane changes. Chaos, Solitons & Fractals, 2022, vol. 155, p. 111790, DOI:10.1016/j.chaos.2022.111790.
- 27. Arefin M.R., Kabir K.M.A., Jusup M., et al. Social efficiency deficit deciphers social dilemmas. Scientific Reports, 2020, v. 10, no. 1, pp. 1-9, DOI:10.1038/s41598-020-72971-y.

Bykov Nikita Valerevich. D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Physics and Director of the Research Center "Sociophysics of Transport Systems" at the Russian University of Transport (RUT-MIIT); Professor at Bauman Moscow State Technical University. Author ID: 620361, SPIN: 8216-2987, ORCID: 0000-0002-1930-6996, bykov@bmstu.ru. Russian University of Transport (RUT-MIIT), 127994, Moscow, Russia.

Kostrov Maksim Alekseevich. PhD student, Junior Researcher at the Sociophysics of Transport Systems Research Center of the Physics Department of Russian University of Transport (RUT-MIIT). AuthorID: 1228130, SPIN: 9289-7910, ORCID: 0009-0006-8675-1236, maks.kostrow@yandex.ru. Russian University of Transport (RUT-MIIT), 127994, Moscow, Russia.

Статья поступила в редакцию 28.07.2025; одобрена после рецензирования 17.09.2025; принята к публикации 27.10.2025.

The article was submitted 07/28/2025; approved after reviewing 09/17/2025; accepted for publication 10/27/2025.

УДК 908 (470): 528.9

DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.013

## Проблемы и перспективы создания цифровых двойников объектов культурного наследия Краснодарского края

### Волкова Татьяна Александровна<sup>1</sup>, Кузякина Марина Викторовна<sup>1,2</sup>, Карагян Арсен Ваагнович<sup>1</sup>, Ряскин Арсений Алексеевич<sup>1</sup>

1Кубанский государственный университет,

Россия, Краснодар, marinavkuazyakina@gmail.com

<sup>2</sup>Кубанский государственный технологический университет,

Россия, Краснодар

**Аннотация.** В статье представлен опыт создания цифровых двойников объектов культурного наследия Краснодарского края, проведен геоинформационный анализ полученных моделей. Основной целью данной статьи является оценка перспектив развития концепции цифровых двойников объектов культурного наследия на основе изучения фотограмметрической технологии их создания на примере объектов культурного наследия Краснодарского края. Определены возможные способы использования и перспективы развития созданных цифровых двойников.

**Ключевые слова:** цифровой двойник, объект культурного наследия, фотограмметрия, трехмерная модель, геоинформационный анализ

**Цитирование:** Волкова Т.А. Проблемы и перспективы создания цифровых двойников объектов культурного наследия Краснодарского края / Т.А. Волкова, М.В. Кузякина, А.В. Карагян, А.А. Ряскин // Информационные и математические технологии в науке и управлении,  $2025. - N \cdot 24(40). - C. 164-174.$  – DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.013.

**Введение.** В истории человечества одни уникальные природные и культурные объекты с течением времени сменялись другими под воздействием природного или антропогенного фактора. Сейчас, в эпоху развития информационных технологий, существует множество методов, в частности фотограмметрический, для сохранения и изучения объектов наследия на цифровых носителях.

Цифровой двойник объекта культурного наследия (далее – ОКН) – это не просто технологический инструмент, но и способ сохранить историческую память для будущих поколений, обеспечивая доступ к культурным и историческим ценностям в эпоху цифровизации, чтобы сравнить с той картиной, которая предстанет перед ними, если они посетят местоположение объекта, или же узнать об объектах, которые были разрушены ранее.

Актуальность цифровизации культуры, включая культурное наследие, закреплена на законодательном уровне в распоряжении Правительства РФ от 20 сентября 2019 года №2129-р под названием «Стратегия развития туризма в Российской Федерации на период до 2035 года» [1]. В рамках развития стратегии развития туризма в РФ разрабатываются меры по повышению доступности культурных и природных объектов, а также по улучшению качества туристических услуг, делая их более современными и удобными для пользователей [2, 3].

Решение стратегической задачи создания электронных баз данных цифровых двойников, включая сбор и обработку геопространственных данных, открывает новые горизонты для эффективного управления инвентаризацией и мониторингом, защиты и регулирования объектов культурного наследия, а также их широкой популяризации среди населения [4].

Следует отметить, что лазерное сканирование является обязательным при выполнении обмерных работ объектов культурного наследия, в т.ч. памятников архитектуры, объектов всемирного наследия ЮНЕСКО. Однако технология лазерного сканирования является значительно более дорогой в исполнении по сравнению с технологией фотограмметрии, которая дает, при верном исполнении и соответствующих габаритах объекта, результаты, не уступающие по точности [5, 6].

Концепция «цифровых двойников» пришла из сферы промышленности и экономики и означает виртуальную модель объекта или процесса, связанную со своим реальным прототипом непрерывным цифровым потоком данных [7].

В 2021 г. появился ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения». Этот стандарт стал первым шагом к стандартизации и регулированию использования цифровых двойников в различных отраслях промышленности. В отсутствие других определяющих документов, он может быть использован, как основа, при создании цифровых двойников в других областях. Одним из важных введенных понятий является понятие цифровой модели – программной реализации математической модели, использующей набор исходных данных и являющейся ядром цифрового двойника. Для рассматриваемой предметной области предлагается в качестве цифровой модели объекта использовать его 3D-модель, в сочетании с данными, описывающими моделируемый объект.

При создании моделей культурных объектов важно учитывать не только геометрическую точность, но и текстурирование, которое отвечает за фотореалистичное представление. Этот процесс требует высокой вычислительной мощности, поскольку современные текстурированные модели могут достигать гигабайтного объёма данных. Для оптимизации применяются алгоритмы редукции полигонов, как, например, в прикладной программе для создания фотограмметрических цифровых моделей Agisoft [8, 9].

**1. Материалы и методы исследования.** Технология создания «цифрового двойника» объекта культурного наследия включает несколько этапов.

Схема, представляющая обобщенную технологию создания цифрового двойника объекта культурного наследия, представлена на рисунке 1.

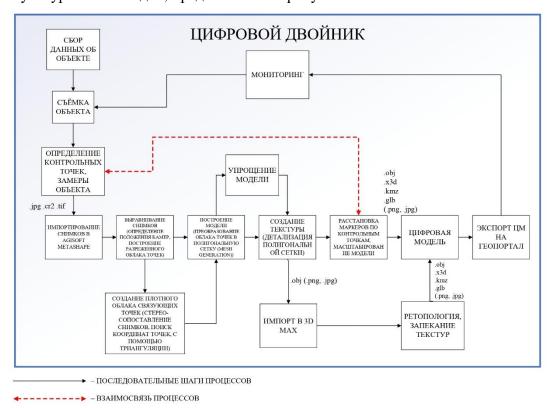


Рис. 1. Технология создания цифрового двойника

Основополагающим этапом создания цифрового двойника является этап создания цифровой модели объекта. Процесс создания цифровой модели объекта культурного наследия включает несколько ключевых стадий. На первой стадии выполняется сбор данных —

фотосъёмка объекта с разных ракурсов с учётом освещения и перекрытия снимков. Далее изображения загружаются в специализированное ПО для обработки и построения 3D-модели: алгоритмы фотограмметрии выравнивают снимки, создают облако точек, формируют полигональную сетку и устраняют шумы [6, 7]. Затем выполняется текстурирование, где на поверхность модели накладываются фотореалистичные изображения, что придаёт ей визуальную достоверность [8, 9]. На заключительной стадии проводится оптимизация модели – снижение числа полигонов и сжатие текстур для удобного использования в различных приложениях.

Следующий этап предполагает периодический мониторинг объектов культурного наследия, когда база данных пополняется релевантными данными об изменении их состояния. Этот этап обеспечит двусторонние информационные связи с объектом. Тогда можно будет говорить о создании фотореалистичного цифрового двойника, пригодного для анализа, виртуальных экскурсий, реставрации и других целей [10, 11].

Кенотаф Хапача Лакшука, памятник минеральной воде в г. Горячий Ключ, могила С.В. Очаповского, скульптура «Запорожцы пишут письмо турецкому султану», памятник Екатерине ІІ. в г. Краснодар, Шапсугский дольмен около станицы Шапсугской являются объектами культурного наследия Краснодарского края и обладают всеми свойствами, необходимыми для создания цифровых двойников [12, 13].

На данном этапе проводимого исследования, в условиях отсутствия мониторинга, имеет смысл говорить о разработке цифровых моделей на основе 3D-визуализации фотограмметрическим способом, как основе цифрового двойника объектов культурного наследия, которые будут представлены на географическом портале, обеспечивающем отслеживание динамики цифровых моделей на всех этапах жизненного цикла каждого из исследуемых объектов.

- **2. Результаты.** Полученные модели пригодны для дальнейшего использования в следующих целях:
  - эффективно управлять и развивать туристические территории (туризм);
  - повысить безопасность общественного пространства (безопасность);
  - помочь удаленно изучать историю и культуру Краснодарского края (образование и популяризация);
  - проводить реставрационные работы исторических памятников (реставрация и консервация);
  - обеспечить дистанционное изучение (научные исследования) [14-16].

Однако стоит отметить, что существуют некоторые факторы, которые сдерживают развитие цифровых двойников [7]. К таким факторам можно отнести высокую стоимость внедрения технологии, а также недостаточный уровень квалификации кадров и отсутствие четкого нормативного регулирования в этой области, что требует, для дальнейшего успешного развития технологии, провести еще дополнительные исследования, в частности, разработать полную детализированную нормативно-правовую базу.

**2.1.** Создание цифровой модели ОКН «Кенотаф Хапача Лакшука». Мраморный столб-памятник Бжедукского князя «Кенотаф Хапача Лакшука» (или Адыгский столб), расположенный в городе Горячий ключ (44°37′23″ с.ш., 39°05′37″ в.д., WGS–84), представляет из себя кенотаф, то есть надгробие над пустой могилой (рисунок 2). Изготовлен из мрамора, благодаря чему даже в жаркий день остаётся холодным. На кенотафе есть две дублирующие надписи: одна на арабском, она хорошо видна, вторая на древнеадыгском, которая почти неразличима.

Надпись гласит: «Этот памятник сделан бжедухским князем Айты-Хаджи, родоначальником линии князей Хаджымуковых. В честь своего дворянина Хапача Лакшука, ездившего с ним в Мекку в качестве паломника, и скончавшегося на возвратном пути около г. Дамаск сирийский. Памятник поставлен 1132 Гиджир (1717 год)».

На создании трехмерной модели ОКН «Кенотаф Хапача Лакшука» производилась отработка методики на основе цифровых снимков с помощью фотограмметрии. Среди объектов культурного наследия, исследуемый объект входит в категорию малых, отдельно стоящих объектов, в связи с чем проблем с его обработкой не возникло. Создание цифровой модели ОКН «Кенотаф Хапача Лакшука» производилось согласно следующим этапам: замер объекта на местности, съёмка объекта, загрузка снимков в ПО Agisoft Metashape, выравнивание снимков, построение трёхмерной модели на основе разреженного облака связующих точек (при необходимости, создание плотного облака точек), построение текстуры, расстановка маркеров, экспорт модели. В таблице 1 приведены характеристики полученной модели (рисунок 3).



**Рис. 2.** Объект культурного наследия Краснодарского края «Кенотаф Хапача Лакшука»



Рис. 3. Цифровая модель объекта культурного наследия Краснодарского края «Кенотаф Хапача Лакшука»

**Таблица 1.** Характеристики полученной модели ОКН «Кенотаф Хапача Лакшука»

Параметр	Значение	
Количество полигонов	200068	
Количество вершин	100603	
Цвета вершин	3 канала, uint8	
Текстура	8192x8192, 4 канала, uint8	
Качество	Очень высокое	
Фильтрация карт глубины	Агрессивная	
Объём данных, Мб	67,47	
Высота, м	1,6	
Длина, м	0,45	
Ширина, м	0,45	
Размер объекта	Малый	

**2.2.** Создание цифровой модели ОКН «Шапсугский дольмен». Шапсугский дольмен, находящийся в 500 метрах южнее станицы Шапсугской Абинского района Краснодарского края (44°43′44″ с.ш., 38°05′49″ в.д., WGS–84), ставший вторым объектом, изображен на рисунке 4.

При создании трехмерной модели ОКН «Шапсугский дольмен» возникла необходимость дополнительного упрощения полигональной сетки объекта и уменьшения объема данных, занимаемой моделью. Инструмент Agisoft Metashape позволяет выбрать уровень упрощения модели. Так исходная модель, состоящая из более 10 млн полигонов, была упрощена до 130 тысяч без потери качества итоговой модели [8]. Все сглаженные неровности объекта компенсируются созданием текстуры. В таблице 2 приведены характеристики полученной модели (рисунок 5).



**Рис. 4.** Объект культурного наследия Краснодарского края «Шапсугский дольмен»



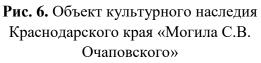
**Рис. 5.** Цифровая модель объекта культурного наследия Краснодарского края «Шапсугский дольмен»

Таблица 2. Характеристики полученной модели ОКН «Шапсугский дольмен»

Параметр	Значение
Количество полигонов	129500
Количество вершин	65153
Цвета вершин	3 канала, uint8
Текстура	8192x8192, 4 канала, uint8
Качество	Очень высокое
Фильтрация карт глубины	Умеренная
Объём данных, Мб	110
Высота, м	1,8
Длина, м	2,5
Ширина, м	2,5
Размер объекта	Малый

2.3. Создание цифровой модели ОКН «Могила С.В. Очаповского». Могила профессора С. В. Очаповского в Краснодаре находится на территории ГБУЗ «Детская краевая больница» (45°00′43″ с.ш., 38°58′02″ в.д., WGS–84) (рисунок 6). При создании трехмерной модели ОКН «Могила С.В. Очаповского» возникла проблема создания текстуры. В ходе создания модели могут возникнуть пробелы на поверхности модели. Инструменты Agisoft Metashape позволяют заполнять отверстия. Однако пустую полость модели, которую можно увидеть снизу, алгоритмы Agisoft определяют, как пробел. При заполнении этого отверстия возникают дефекты в топологии каркасной сетки полигонов и создании текстуры. Решением стало выборочное заполнение отверстий модели. В таблице 3 приведены характеристики полученной модели (рисунок 7).







**Рис. 7.** Цифровая модель объекта культурного наследия Краснодарского края «Могила С.В. Очаповского»

**Таблица 3.** Характеристики полученной модели ОКН «Могила С.В. Очаповского»

Параметр	Значение
Количество полигонов	168764
Количество вершин	85098
Цвета вершин	3 канала, uint8
Текстура	8192x8192, 4 канала, uint8
Качество	Очень высокое
Фильтрация карт глубины	Агрессивная
Объём данных, Мб	291,35
Высота, м	2,3
Длина, м	3
Ширина, м	4
Размер объекта	Средний

**2.4.** Создание цифровой модели ОКН «Памятник Екатерине II». Памятник Екатерине II находится в самом центре города Краснодара (45°00′55″ с.ш., 38°58′06″ в.д., WGS-84) возле закладного камня и городского сада и является излюбленной достопримечательностью краснодарцев (рисунок 8). Однако сделать цифровую модель без применения БПЛА оказалось невозможным. Проблема – крупный размер объекта – высота памятник 13,8 м. Невозможно оказалось создать точную полноценную модель, используя наземные технические средства, такие, как цифровая фотокамера. Недоступность и отсутствие высоких участков объекта не позволяют программному обеспечению в точности создать трёхмерную модель. Решение – использование БПЛА и комбинирование наземных средств. На рисунке 8 изображен памятник Екатерине II, а на рисунке 9 – неудачная попытка создать цифровую модель.

2.5 Создание цифровой модели ОКН «Скульптура «Запорожцы пишут письмо турецкому султану». Скульптура «Запорожцы пишут письмо турецкому султану», которая находится на центральной улице города Краснодара, улице Красной (45°01′53″ с.ш., 38°58′23″ в.д., WGS–84) является еще одним примером неудачного объекта для создания трехмерной модели (рисунок 10). На этот раз геометрические габариты удовлетворительные, неудовлетворительное – положение скульптуры. С одной стороны, скульптура находится не вплотную к стене, с другой – слишком близко для того, чтобы сфотографировать ее под нужным углом на нужном расстоянии.



**Рис. 8.** Объект культурного наследия Краснодарского края «Памятник Екатерине II»

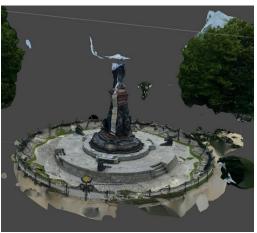


Рис. 9. Неудавшаяся модель с множественными артефактами объекта культурного наследия Краснодарского края «Памятник Екатерине II»

Проблема в данном случае состоит в сложности получения снимков объекта. Для создания высокоточной модели объекта необходимо получение снимков с перекрытием в диапазоне 50–80 % [5, 6]. Также необходимо получить снимки, фиксирующие абсолютно все участки объекта. В противном случае невозможно программно воспроизвести объект, в результате была получена деформированная модель с разрывами (рисунок 11).



Рис. 10. Объект культурного наследия Краснодарского края «Скульптура «Запорожцы пишут письмо турецкому султану»



Рис. 11. Неудавшаяся модель с множественными разрывами объекта культурного наследия Краснодарского края «Скульптура «Запорожцы пишут письмо турецкому султану»

2.4 Создание цифровой модели ОКН «Памятник минеральной воде». Памятник минеральной воде — это обелиск, установленный в 1914 году на Минеральной поляне у подножия Абадзехской (Ключевой) горы (44°37′15″ с.ш., 39°05′38″ в.д., WGS–84) в городе Горячий Ключ (рисунок 12). Для создания его цифровой модели пришлось прибегать к стороннему программному обеспечению (Autodesk 3Ds Max) для внедрения в триангуляционную mesh-модель исправленных вручную полигональных векторных трехмерных моделей [10, 11].

Стоит отметить, что, используя такие методы, будет потрачено гораздо больше сил и времени, и даже после приложенных усилий невозможно в точности воссоздать реальный объект, так как невозможно вручную воспроизвести все особенности объекта, такие, как

естественные шероховатости, цвета и другие элементы [14, 15]. Этот метод подходит только для некоторых масштабов.

Монумент воздвигнут в честь 50-летия освоения Псекупских минеральных вод. На вершине обелиска установлен двуглавый орёл — символ величия Российской империи, а на самом монументе прикреплены мемориальные таблички с именами создателей курорта и тех, кто трудился над его сохранением (рисунок 12). В случае с памятником минеральной воде сложности возникли с двуглавым орлом, находящимся на шаре. На рисунке 13 изображены неудавшиеся детали модели, которым потребовалась доработка, на рисунке 14 — готовая цифровая модель.



Рис. 12. Объект культурного наследия Краснодарского края «Памятник минеральной воле»



Рис. 13. Неудавшиеся детали модели с множественными артефактами объекта культурного наследия Краснодарского края «Памятник минеральной воде»



Рис. 14. Цифровая модель объекта культурного наследия Краснодарского края «Памятник минеральной воде»

**Заключение.** Задача создания цифровых двойников объектов культурного наследия актуальна в связи с потенциальным широким спектром их применения, от туризма до археологии и образования.

Говорить о полноценных цифровых двойниках можно только в условиях мониторинга состояния объектов культурного наследия, когда база данных разрабатываемого географического портала цифровых двойников будет постоянно пополняться релевантными данными. До тех пор имеет смысл говорить о разработке цифровых моделей на основе 3D-визуализации, как основе цифровых двойников.

Попытка создания цифровых моделей показала следующие проблемы, с которыми может столкнуться специалист: для различных габаритов объектов необходимо применять различное оборудование для выполнения фотосъемки; расположение объекта играет ключевую роль при проведении фотосъемки; в случаях получения незначительных деформаций модели можно использовать дополнительное ПО, позволяющее редактировать объекты трёхмерной графики, однако это увеличивает кратно трудозатраты на создание модели. Таким образом, необходимо готовить квалифицированные кадры и разрабатывать полную детализированную нормативно-правовую базу в этой области для дальнейшего успешного развития исследуемой технологии.

**Благодарности.** Исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках научно-инновационного проекта № НИП-20.1/200.

#### Список источников

1. Стратегия развития туризма в Российской Федерации в период до 2035 года — URL: https://economy.gov.ru/material/dokumenty/strategiya\_razvitiya\_turizma\_v\_rossiyskoy\_federacii\_na\_period\_do \_2035\_goda\_utverzhdena\_rasporyazheniem\_ot\_20\_sentyabrya\_2019\_g\_2129\_r.html (дата обращения 10.08.2023).

- 2. Кравченко И.В. Применение цифровых и ГИС-технологий для целей визуализации и сохранения историко-культурного наследия Евпатории советского периода / И.В. Кравченко, А.Н. Яковлев // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология, 2022. Т. 8. № 4. С. 299-308.
- 3. Постановление Правительства Российской Федерации от 24 декабря 2021 г. № 2439 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие туризма». https://www.economy.gov.ru/material/dokumenty/postanovlenie\_pravitelstva\_rossiyskoy\_federacii\_ot\_24\_deka brya\_2021\_g\_2439.html (дата обращения 10.10.2023).
- 4. Konstantakis M., Trichopoulos G., Aliprantis J. et al. An enhanced methodology for creating digital twins within a paleontological museum using photogrammetry and laser scanning techniques. Heritage, 2023, v. 6(9), pp. 5967-5980, DOI:10.3390/heritage6090314.
- 5. Назаров А.С. Фотограмметрия / А.С. Назаров. Минск: Тетра-Системс, 2006. 368 с.
- 6. Катермин В.С. Фотограмметрия: 3d-модель из фотографий / В.С. Катермин // Актуальные научные исследования в современном, 2021. № 12-11 (80). С. 89-94. EDN: QEMMPS.
- 7. Прохоров А. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. / А. Прохоров, М. Лысачев // М.: ООО «АльянсПринт», 2020. 401 с.
- 8. Croce V., Billi D., Carot G., et al. Comparative assessment of neural radiance fields and photogrammetry in digital heritage: impact of varying image conditions on 3D reconstruction. Remote sensing, 2024, no. 16(2), 301 p., DOI:10.3390/rs16020301.
- 9. Yusri M.H.A., Johan M.A., Ramli M.H.M. Preservation of cultural heritage: a comparison study of 3D modelling between laser scanning, depth image and photogrammetry methods. Remote sensing, 2022, no. 19(2), pp. 125-145, DOI:10.24191/jmeche.v19i2.19768.
- 10. Condorelli F., Rinaudo F., Salvadore F. et. al. Comparison between 3D reconstruction using NERF neural networks and MVS algorithms on cultural heritage images. The International archives of the photogrammetry remote sensing and spatial information sciences XLIII-B2-2021:565-570, 2021, pp. 565-570, DOI:10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2021-565-2021.
- 11. Ippoliti E., Meschini A., Sicuranza F. Digital photogrammetry and structure from motion for architectural heritage: comparison and integration between procedures. Geospatial intelligence: concepts, methodologies, tools, and applications, IGI Global: Hershey, PA, USA, 2019; V2, pp.959-1018, DOI:10.4018/978-1-4666-8379-2.ch004.
- 12. Грушин С. Фотограмметрия в археологии методика и перспективы / С. Грушин, И. Сосновский // Теория и практика археологических исследований, 2018. –Т. 21. № 1. С. 99-105. DOI:10.14258/tpai(2018)1(21).-08.
- 13. Schwidefsky K. Grundriss der Photogrammetrie. Stuttgart: Teubner, 1954, 432 p.
- 14. Caroti G., Piemonte A. Integration of laser scanning and photogrammetry in architecture survey. Open Issue in Geomatics and Attention to Details. Communications in Computer and Information Science, 2020, C.70-185, DOI:10.1007/978-3-030-62800-0\_14.
- 15. James D.W., Belblidia F., Eckermann J.E., et al. An Innovative photogrammetry color segmentation based technique as an alternative approach to 3D scanning for reverse engineering design. Computer-Aided Design and Applications, 2017, 14, pp. 1-16, DOI:10.1080/16864360.2016.1199751.
- 16. Шпак П.С. Концепция цифровых двойников как современная тенденция цифровой экономики / П.С. Шпак, Е.Г. Сычева, Е.Е. Меринская // Вестник Омского университета. Серия «Экономика», 2020. —№ 1. С. 57-68. EDN: DWTCFU.

Волкова Татьяна Александровна. Канд. геогр. наук, доцент, доцент кафедры международного туризма и менеджмента ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет». основные направления исследований: рекреационная география, туризм, туристско-рекреационный комплекс, рекреационное природопользование. AuthorID: 625674, SPIN: 4045-2017, ORCID: 0000-0002-2054-0683, mist-next4@inbox.ru. 350040, Poccuя, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149.

Кузякина Марина Викторовна. Канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры геоинформатики ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет». Основные направления исследований автора: анализ данных, машинное обучение, геоинформатика, физика атмосферы, геостатистика. AuthorID: 522457, SPIN: 4945-6665, ORCID: 0000-0003-0492-3630, MarinaVkuzyakina@gmail.com. 350040, Россия, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 140

Карагян Арсен Ваанович. Аспирант кафедры анализа данных и искусственного интеллекта ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет». Основные направления исследований автора: анализ данных, искусственный интеллект, геоинформатика, автоматизация процессов, лазерное сканирование. AuthorID: 1108596, SPIN: 1130-2955, ORCID: 0000-0001-9673-9114, karagyan.arsen@yandex.ru. 350040, Россия, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149.

**Ряскин Арсений Алексеевич.** Студент направления «Картография и геоинформатика» ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет». Основные направления исследований автора: геоинформатика, лазерное сканирование, фотограмметрия. AuthorID: 1282839, SPIN: 5279-3455, ORCID: 0009-0005-2144-7471, Arseniy.Ryaskin@yandex.ru. 350040, Россия, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149.

UDC 908 (470): 528.9

DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.013

### Problems and prospects of creating digital twins of cultural heritage objects in the Krasnodar Region

Tatiana A. Volkova<sup>1</sup>, Marina V. Kuzyakina<sup>1,2</sup>, Arsen V. Karagyan<sup>1</sup>, Arseniy A. Ryaskin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kuban state university, Russia, Krasnodar, marinavkuazyakina@gmail.com

**Abstract.** The article presents the experience of creating digital twins of cultural heritage objects of the Krasnodar region, geoinformational analysis of the obtained models. The main purpose of this article is to assess the prospects of development of the concept of digital doubles of cultural heritage objects based on the study of photogrammetric technology of their creation on the example of cultural heritage objects of Krasnodar Krai. Possible ways of use and prospects of development of the created digital doubles are defined.

**Keywords:** digital twin, cultural heritage object, photogrammetry, three-dimensional model, geoinformation analysis

**Acknowledgements:** The study was financially supported by the Kuban Science Foundation within the framework of scientific-innovation project No. NIP-20.1/200.

### References

- 1. Strategiya razvitiya turizma v Rossijskoj Federacii v period do 2035 goda [Strategy for the Development of Tourism in the Russian Federation until 2035], available at: https://economy.gov.ru/material/dokumenty/strategiya\_razvitiya\_turizma\_v\_rossiyskoy\_federacii\_na\_period\_do\_2035\_goda\_utverzhdena\_rasporyazheniem\_ot\_20\_sentyabrya\_2019\_g\_2129\_r.html (accessed: 08/10/2023).
- 2. Kravchenko I.V., Yakovlev A.N. Primeneniy tsifrovykh i GIS-tekhnologiy dlya tseley vizualizatsii i sokhraneniya istoriko-kulturnogo naslediya Yevpatorii sovetskogo perioda [The use of digital and GIS technologies for the visualization and preservation of the historical and cultural heritage of the Soviet period in Yevpatoria]. Uchenye zapiski Krymskogo federalnogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya [Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology], 2022, vol. 8, no. 4, pp. 299-308.
- 3. Postanovlenie Pravitel`stva Rossijskoj Federacii ot 24 dekabrya 2021 g. № 2439 «Ob utverzhdenii gosudarstvennoj programmy` Rossijskoj Federacii «Razvitie turizma» [Decree of the Government of the Russian Federation dated December 24, 2021 No. 2439 «On the approval of the state program of the Russian Federation 'Tourism Development»], available at: https://www.economy.gov.ru/material/dokumenty/postanovlenie\_pravitelstva\_rossiyskoy\_federacii\_ot\_24\_dekabrya\_2021\_g\_2439.html (accessed: 10/10/2023).
- 4. Konstantakis M., Trichopoulos G., Aliprantis J. et al. An enhanced methodology for creating digital twins within a paleontological museum using photogrammetry and laser scanning techniques. Heritage, 2023, v. 6(9), pp. 5967-5980, DOI:10.3390/heritage6090314.
- 5. Nazarov A.S. Fotogrammetriya [Photogrammetry]. Minsk, Tetra-Systems, 2006, 368 p.
- 6. Katermin V.S. Fotogrammetriya: 3d-model iz fotografiy [Photogrammetry: 3d-model from photos]. Aktualnye nauchnye issledovaniya v sovremennom [Actual scientific research in the modern world], 2021, no. 12-11 (80), pp. 89-94, EDN: QEMMPS.
- 7. Prokhorov A., Lysachev M. Tsifrovoy dvoinik. Analiz, trendy, mirovoy opyt [Digital twin. Analysis, trends, world experience]. Moscow, AlliancePrint Publ., 2020, 401 p.
- 8. Croce V., Billi D., Carot G., et al. Comparative assessment of neural radiance fields and photogrammetry in digital heritage: impact of varying image conditions on 3D reconstruction. Remote sensing, 2024, no. 16(2), 301 p., DOI:10.3390/rs16020301.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Kuban state technological university, Russia, Krasnodar

- 9. Yusri M.H.A., Johan M.A., Ramli M.H.M. Preservation of cultural heritage: a comparison study of 3D modelling between laser scanning, depth image and photogrammetry methods. Remote sensing, 2022, no. 19(2), pp. 125-145, DOI:10.24191/jmeche.v19i2.19768.
- 10. Condorelli F., Rinaudo F., Salvadore F. et. al. Comparison between 3D reconstruction using NERF neural networks and MVS algorithms on cultural heritage images. The International archives of the photogrammetry remote sensing and spatial information sciences XLIII-B2-2021:565-570, 2021, pp. 565-570, DOI:10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2021-565-2021.
- 11. Ippoliti E., Meschini A., Sicuranza F. Digital photogrammetry and structure from motion for architectural heritage: comparison and integration between procedures. Geospatial intelligence: concepts, methodologies, tools, and applications, IGI Global: Hershey, PA, USA, 2019; V2, pp.959-1018, DOI:10.4018/978-1-4666-8379-2.ch004.
- 12. Grushin S., Sosnovsky I. Fotogrammetriya v arkheologii metodika i perspektivy [Photogrammetry in archaeology methods and prospects]. Teoriya i praktika arkheologicheskikh issledovaniy [Theory and practice of archaeological research], 2018, vol. 21, no. 1, pp. 99-105, DOI:10.14258/tpai(2018)1(21).-08.
- 13. Schwidefsky K. Grundriss der Photogrammetrie. Stuttgart: Teubner, 1954, 432 p.
- 14. Caroti G., Piemonte A. Integration of laser scanning and photogrammetry in architecture survey. Open Issue in Geomatics and Attention to Details. Communications in Computer and Information Science, 2020, C.70-185, DOI:10.1007/978-3-030-62800-0\_14.
- 15. James D.W., Belblidia F., Eckermann J.E., et al. An Innovative photogrammetry color segmentation based technique as an alternative approach to 3D scanning for reverse engineering design. Computer-Aided Design and Applications, 2017, 14, pp. 1-16, DOI:10.1080/16864360.2016.1199751.
- 16. Shpak P.S., Sycheva E.G., Merinskaya E.E. Kontseptsiya tsifrovykh dvoinikov kak sovremennaya tendentsiya tsifrovoy ekonomiki [The concept of digital twins as a modern trend of the digital economy]. Vestnik Omskogo universiteta. Seriya «Ekonomika» [Herald of Omsk University. Series "Economics"], 2020, no. 1, pp. 57-68, EDN: DWTCFU.

Volkova Tatiana Alexandrovna. Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of International Tourism and Management of Kuban State University. Main directions of research: recreational geography, tourism, tourism and recreational complex, recreational nature management. AuthorID: 625674, SPIN: 4045-2017, ORCID: 0000-0002-2054-0683, mist-next4@inbox.ru. 350040, Russia, Krasnodar, Stavropolskaya str., 149.

Kuzyakina Marina Viktorovna. Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor of the Department of Geoinformatics of Kuban State University. Main directions of research: data analysis, machine learning, geoinformatics, atmospheric physics, geostatistics. AuthorID: 522457, SPIN: 4945-6665, ORCID: 0000-0003-0492-3630, MarinaVkuzyakina@gmail.com. 350040, Russia, Krasnodar, Stavropolskaya str., 149

Karagyan Arsen Vahanovich. Postgraduate student of the Department of Data Analysis and Artificial Intelligence of Kuban State University. Main directions of research: data analysis, artificial intelligence, geoinformatics, process automation, laser scanning. AuthorID: 1108596, SPIN: 1130-2955, ORCID: 0000-0001-9673-9114, karagyan.arsen@yandex.ru. 350040, Russia, Krasnodar, Stavropolskaya str., 149.

Ryaskin Arseniy Alekseevich. Student of the direction "Cartography and Geoinformatics" of Kuban State University. Main directions of research: geoinformatics, laser scanning, photogrammetry. AuthorID: 1282839, SPIN: 5279-3455, ORCID: 0009-0005-2144-7471, Arseniy.Ryaskin@yandex.ru. 350040, Russia, Krasnodar, Stavropolskaya str., 149.

Статья поступила в редакцию 30.03.2025; одобрена после рецензирования 28.04.2025; принята к публикации 16.10.2025.

The article was submitted 03/30/2025; approved after reviewing 04/28/2025; accepted for publication 10/16/2025.

### Программные системы и комплексы

УДК 658.5.012.011.56

DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.014

## Совершенствование методов подбора САПР при разработке цифровой модели объекта

### Говорков Алексей Сергеевич, Короткова Ксения Евгеньевна

Иркутский национальный исследовательский технический университет,

Poccuя, Иркутск, govorkov\_as@ex.istu.edu

**Аннотация:** Система автоматизированного проектирования (САПР), применяемая на предприятии для создания цифровой модели сооружений или изделий, представляет собой совокупность нескольких программных продуктов, каждый из которых определяет строго определенные функции в составе производственной системы предприятия.

Рациональный выбор САПР начинается на этапе подготовки к созданию цифровой модели. Выбор должен учитывать программное обеспечение (ПО), необходимое для 3D-моделирования готового объекта, а также конечное ПО, предназначенное для вывода всего комплекта проектной документации на печать, либо для формирования электронного комплекта документации для отправки заказчику.

В условиях санкций иностранных государств необходимо взвешенно подходить к выбору программных продуктов, учитывая все их особенности, преимущества и функциональность. Кроме того, необходимо рассматривать возможность организации технической поддержки этих программных продуктов, а также их адаптацию к тому отечественному ПО, которое используется для составления вспомогательных документов, входящих в комплект проектной документации.

Для эффективной организации работ между отдельным ПО с целью возможности его взаимодействия друг с другом, необходимо разработать методику, которая бы позволила снизить время взаимодействия и реализовать механизмы взаимодействия. Эти механизмы предусматривают передачу информации из одного программного комплекса в другой с целью обработки информации и автоматического формирования дополнительных документов (смет, ведомостей объемов работ, спецификаций и т.д.).

В связи с этим, весьма актуальной является разработка нового метода подбора САПР и формирования основных принципов передачи информации.

**Ключевые слова:** программное обеспечение, совместимость, граф, база данных, функциональность, метод

**Цитирование:** Говорков А.С. Совершенствование методов подбора САПР при разработке цифровой модели объекта / А.С. Говорков, К.Е. Короткова // Информационные и математические технологии в науке и управлении,  $2025. - \mathbb{N} \ 4(40). - \text{C}.175-186. - \text{DOI}: 10.25729/\text{ESI}. 2025. 40.4.014.$ 

**Введение.** Проектные компании и предприятия по производству различной продукции используют различное программное обеспечение, которое позволяет выполнять следующие функции:

- 1) разрабатывать проектную и конструкторскую документацию;
- 2) осуществлять работу с базами данных оборудования, изделий и материалов;
- 3) производить сметные расчеты и расчеты объемов работ;
- 4) разрабатывать дорожные карты проекта;
- 5) составлять договора с контрагентами;
- б) рассматривать документацию на оборудование сторонних поставщиков;
- 7) хранить проектную и конструкторскую документацию.

Длительное время, начиная с конца 90-х годов XX века, когда на российских предприятиях стали постепенно внедряться информационные технологии, работа осуществлялась с использованием зарубежного ПО. Проектные компании использовали программные продукты Autodesk, которые отвечали всем требованиям и обладали высокой функциональностью. На тот период подобные программные продукты отечественного производства полностью отсутствовали.

Исторические предпосылки использования зарубежного программного обеспечения в крупных проектных компаниях нашей страны были обусловлены полным отсутствием отечественных разработок в этом сегменте на конец 90-х годов XX века. На тот момент все компании стали переходить на автоматизированное проектирование, которое позволяло повысить конкурентоспособность на внутреннем и международном рынках, снизить время на разработку проектной документации, повысить производительность труда.

В течение почти 25 лет ситуация не менялась. В результате в проектных компаниях сформировался штат высококвалифицированных сотрудников, которые имеют опыт работы с зарубежным ПО, полностью удовлетворяющим потребности проектировщиков. Кроме того, благодаря силам своих сотрудников, либо за счет сторонних услуг за это время произошла интеграция зарубежного ПО в отечественные программные продукты. Были разработаны многочисленные программы-связки, которые позволяют передать данные из одного вида ПО в другой в автоматическом режиме. При этом результаты, полученные в одном программном продукте, являются исходными данными для другого продукта [1].

Подобная налаженная система проектирования была характерна для предприятий нефтегазовой отрасли, авиастроения, ракетно-космической техники, которые осуществляют процесс проектирования, начиная от отдельного элемента и заканчивая сложными многофункциональными устройствами, в состав которых может входить до нескольких тысяч отдельных элементов [2].

В течение четверти века используемое для проектирования ПО периодически заменялось на новые версии, осуществлялась техническая поддержка клиентов, проводилось обучение новых сотрудников работе с опробованными программными продуктами и адаптация их к потребностям отдельных предприятий и компаний. Подобная практика показывала высокую эффективность, которая заключалась в наработке каждой компанией бесценного опыта, составлении баз данных отдельного проекта и единой базы данных предприятия.

Однако, в начале 2022 года возникли определенные трудности в использовании зарубежного ПО, так как многие западные компании стали прекращать свою работу в нашей стране. Прекратились обновление ПО и его техническая поддержка, стало невозможным проведение периодического обучения сотрудников компаний [3, 4].

В связи с этим у проектных компаний возникли значительные сложности с работой в условиях санкций иностранных государств, поэтому в настоящее время, чтобы сохранять высокий темп работ, оставаться конкурентоспособными на рынке, развивать проектную деятельность, необходимо вести разработку методов, которые позволят эффективно использовать совокупность нескольких программных продуктов. В статье делается попытка предложить методологический подход к решению этой проблемы, основанный на использовании теории графов.

**Проблемы использования зарубежных и отечественных САПР.** На всех предприятиях, осуществляющих проектирование в различных областях промышленности, большой проблемой является использование зарубежных и отечественных САПР.

К проблемам использования САПР иностранного производства относятся [5-8]:

- прекращение технической поддержки и обновления ПО в связи с санкциями иностранных государств;
- перевод на законодательном уровне некоторых предприятий на отечественнее ПО;
- невозможность организации совместной работы иностранного ПО с отечественными программными продуктами («Гранд-смета», программами платформы «1С» и других);

- отсутствие возможности проектирования и использования в проектировании деталей, выпускаемых по ГОСТ, ТУ, ОСТ и другим нормативным документам, действующим на территории РФ.
  - Существенными преимуществами САПР иностранного производства являются [9-12]:
- 1) широкая функциональность;
- 2) наличие в компаниях хорошо обученного персонала, имеющего опыт работы с программными продуктами иностранного производства;
- 3) возможность доработки ПО под специальные требования компании (при необходимости) и высокий уровень приспособленности ПО для этих целей;
- 4) отлаженные системы автоматизированного проектирования, связанные с внутренними корпоративными сетями;
- 5) большие объемы баз данных (БД), созданных на основе иностранного ПО и интегрированные в его состав.

В отличие от программных продуктов иностранного производства, отечественные САПР имеют ряд существенных недостатков:

- 1) ограниченная функциональность при проектировании сложных изделий, узлов и агрегатов;
- 2) отсутствие или ограничение использования в рамках одного программного продукта расчетных пакетов, позволяющих осуществлять прочностные, термические, геометрические расчеты проектируемых изделий;
- 3) необходимость разработки специализированных модулей для передачи данных в ПО, формирующее ведомости объемов работ, сметы, спецификации;
- 4) невозможность использования системы координат в программных комплексах, используемых для разработки изделий авиастроения и машиностроения.

Решение указанных выше проблем, как правило, выполняется в рамках одного предприятия силами специалистов отдела Информационных технологий. Как правило, самостоятельное решение вопросов по расширению функциональности САПР занимает большое количество времени и трудовых ресурсов, что снижает эффективность работ по проектированию новых изделий [13]. Для продолжения работы с ПО иностранного производства требуется разработка специализированных подходов, которые обеспечивают его работоспособность и возможность взаимодействия с базами данных, которые (в настоящее время) уже интегрированы в это ПО в виду его длительного использования во многих компаниях, осуществляющих свою работу в области машиностроения и авиастроения [14].

В связи с этим, при планировании производства новых видов авиационной техники необходимо разработать оптимальный подход к выбору программного обеспечения, с учетом новых вызовов, которые накладывают на эту область санкции иностранных государств.

**Требования к новому методологическому подходу (на примере проектирования авиационной техники).** При разработке новых видов продукции, которые требуют использования ПО для конструирования, проведения различных видов расчетов, разработки 3D моделей, необходимо сформировать инновационный методологический подход к выбору САПР, который бы отвечал следующим требованиям [15, 16]:

- использование универсального ПО, доступное к закупке на внутреннем рынке и отвечающее всем требованиям пользователей;
- учет всех требований пользователей, которые применяют ПО для проектирования;
- обеспечение совместимости этого ПО с программными продуктами, предназначенными для составления сводных сметных расчетов, формирования ведомостей объемов работ, спецификаций и ведомостей материалов;

соответствие требованиям политики компании в этой области.

На рисунке 1 приведены этапы процесса проектирования авиационной техники – воздушного судна MC-21.

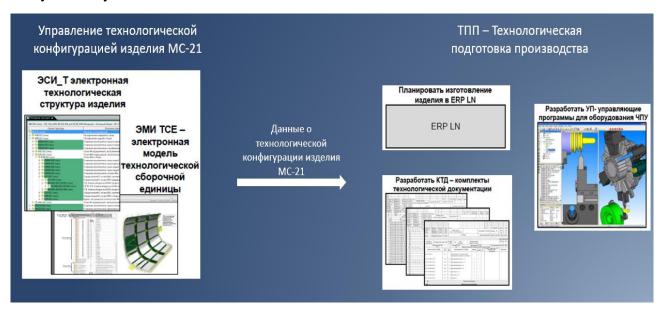


Рис.1. Этапы процесса проектирования авиационной техники

Вначале выполняется формирование технологической конфигурации изделия. Для этого используются различные программные продукты, в которых осуществляется отрисовка отдельных деталей, элементов, узлов, агрегатов. Кроме того, эти программные продукты осуществляют обращение к БД проекта, в которой содержится вся информация о каждом элементе воздушного судна. При этом, следует отметить, что каждый из программных продуктов должен иметь возможность обращения к этой базе данных.

После формирования технологической конфигурации изделия осуществляется передача данных о ней в специализированное ПО, которое позволяет осуществлять:

- планирование процесса производства;
- разработку «дорожной карты» проекта;
- разработку конструкторской и технологической документации;
- комплектацию проекта;
- разработку управляющих программ для работы технологического оборудования, которое будет использовано для изготовления отдельных элементов готового изделия;
- контроль готовой продукции, начиная от отдельного элемента и заканчивая испытаниями воздушного судна.

Каждый из этапов процесса проектирования воздушного судна представляет собой совокупность отдельных подэтапов. Они представляют собой совокупность различных действий сотрудников, занятых в процессе проектирования, и направленных на создание, в конечном итоге, сложного изделия, состоящего из отдельных элементов.

При этом, для реализации подэтапов процесса проектирования используется различное ПО, предназначенное для:

- отрисовки 2D и 3D чертежей элементов, узлов, агрегатов, систем;
- составления спецификаций;
- разработки опросных листов на оборудование;
- составления ведомостей объемов работ;
- проведения технологических, гидравлических, прочностных, сметных расчетов;

- осуществления операций контроля качества цифровой модели готового изделия;
- передачи проектной документации в производство;
- разработки программ для работы станков и технологического оборудования для обработки деталей.

Все эти подэтапы требуют использования ПО, которое в большей или меньшей степени позволяет достичь указанных выше результатов с учетом увеличения производительности труда и снижения времени, затрачиваемого на реализацию каждого из этих подэтапов.

**Предлагаемый методологический подход к рациональному выбору ПО.** Для решения поставленной задачи был разработан методологический подход к рациональному выбору ПО. Предложенный подход позволяет выбрать наиболее эффективное ПО, которое, кроме того, способно взаимодействовать с другими программными продуктами путем передачи либо анализа данных. На рисунке 2 приведены основные положения методологического подхода к выбору ПО.

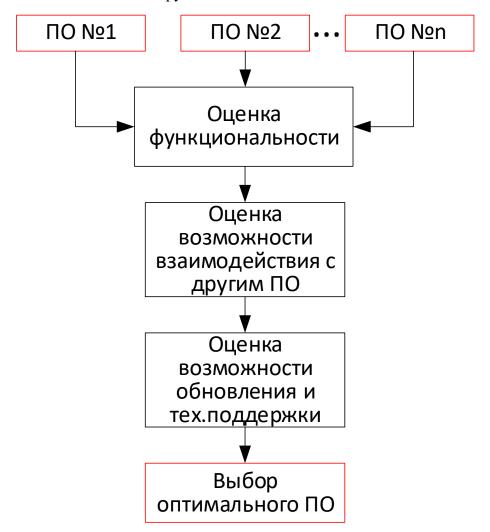


Рис. 2. Схема методологического подхода к выбору программного обеспечения

Для выбора ПО необходимо руководствоваться, прежде всего, его функциональностью, т.е. способностью, либо неспособностью обеспечить все потребности пользователей. Основным критерием выбора ПО при разработке 3D-модели является выполнение следующих требований:

- 1) возможность использования БД проекта с трехмерным изображением;
- 2) обеспечение необходимой при проектировании системы координат, которая используется для размещения в узле или агрегате отдельных деталей;

- 3) возможность отрисовки 3D-деталей и изделий;
- 4) возможность использования расчетных программ при проектировании изделий и их интеграция в графические САПР.

Если ПО отвечает этим требованиям, то выполняется оценка выбранного ПО по возможности передачи данных из разработанной в нем цифровой модели в ПО, которое используется для выпуска дополнительной документации. К такой документации относятся: ведомости объемов работ; технологические карты; сметные расчеты; спецификации оборудования, изделий и материалов; кабельные журналы; ведомости трубопроводов; ведомости теплоизоляции; ведомости кабелей электрообогрева. Вся эта документация формируется автоматически на основе данных, получаемых из 3D-модели. При любых изменениях цифровой модели изделия автоматически происходит изменение указанных выше документов, но это возможно лишь в том случае, если ПО, предназначенное для 3D-проектирования, совместимо с программными продуктами, которые осуществляют генерацию этих вспомогательных документов. Таким образом, выбор всех САПР должен происходить с учетом условий, проиллюстрированных на рисунке 3. Выбор САПР рекомендуется выполнять, осуществляя комплексное использование нескольких программных продуктов, которые совместимы друг с другом.

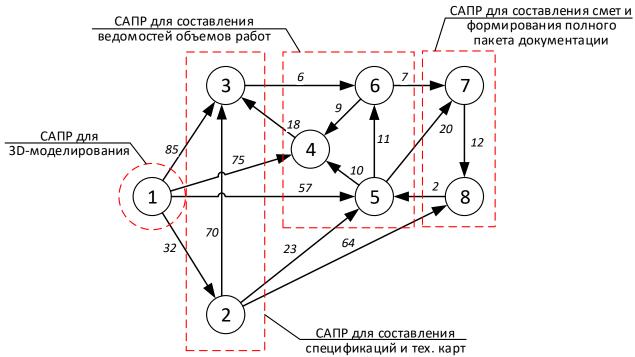


Рис. 3. Граф взаимодействия ПО между собой

Метод графов как основа предложенного подхода. Для эффективного выбора САПР предлагается использовать метод графов. Этот метод позволяет выделить наиболее эффективные пути взаимодействия между отдельными САПР. Метод графов используется в связи с тем, что позволяет проводить анализ сложных систем. Графы обеспечивают возможность вскрыть закономерности и паттерны в данных, за счет этого повышается эффективность проведения анализа сложных систем.

Применительно к проблеме анализа САПР можно отметить, что отдельный программный продукт, входящий в САПР предприятия, является локальной системой управления и обработки данных. Эта сложная система, которая использует в своей работе не только библиотеки, предусмотренные разработчиками, но и базы данных проектной

компании, должна быть подвергнута тщательному анализу для оценки ее эффективности и возможности взаимодействия с другими программными продуктами.

Рассмотрим граф, узлы (вершины) которого обозначают отдельное ПО, взаимодействующее с основным ПО, в котором осуществляется разработка 3D-модели изделия. Разработка 3D-модели представляет собой сложный комплекс проектных работ, который предусматривает использование, пополнение и выбор элементов из БД, отрисовку отдельных деталей, узлов и агрегатов, интеграцию их в единую модель и проверку этой модели на коллизии, соответствие техническому заданию, соответствие нормативной документации и техническим условиям.

Для графа, представленного на рисунке 3, пути взаимодействия между его отдельными элементами показаны стрелками. Те узлы, которые между собой не соединяются, обозначают виды ПО, между которыми взаимодействие не предусмотрено. Цифры, указанные над стрелками, показывают время (в минутах), необходимое пользователю для настройки процесса передачи информации из одного ПО в другое. Таким образом, с использованием такого инструмента, как граф, пользователь может выбрать кратчайший путь между начальной и конечной вершинами, который характеризуется минимальным временем для настройки ПО с целью разработки всей 3D-модели изделия.

Под номером 1 на рисунке 3 указано ПО, в котором непосредственно осуществляется разработка цифровой модели. Под номером 8 указано специализированное ПО, которое формирует общий пакет готовой проектной документации. В этот пакет входят как 3D-чертежи изделия, так и вся сопроводительная документация, которая описана выше и по которой осуществляется производство всех узлов и агрегатов.

Между ПО №1 и ПО №8 находятся средства автоматизированного проектирования (программные продукты и программные комплексы), которые в большей или меньшей степени эффективны при взаимодействии как с ПО №1, №8, так и между собой. С использованием теории графов, на основании алгоритма Дейстры [17] проведем расчет кратчайшего (наиболее эффективного пути) передачи информации от ПО №1 к ПО №8.

Использование алгоритма Дейстры позволяет определить самый короткий путь от вершины №1 до всех остальных вершин. Сущность алгоритма состоит в присвоении вершинам графа временных меток, которые по некоторым правилам заменяются на постоянные метки. Ниже в расчете графа используются следующие обозначения:

- $-L^*(x_i)$  постоянная метка вершины;
- $-L^{H}(x_{i})$  новая временная метка вершины;
- $-L^{c}(x_{i})$  старая временная метка вершины;
- $R_{ij}$  весовой коэффициент, показывающий степень эффективности взаимодействия между отдельными вершинами  $x_i$  и  $x_j$  (то есть между отдельными программными продуктами).

Расчет новой временной метки производится по формуле [18]:

$$L^{H}(x_{j}) = \min[L^{c}(x_{i}), R_{ij} + L^{*}(x_{i})]$$
(1)

По результатам расчетов из нескольких временных меток выбираем минимальную, которая затем принимается как постоянная метка. Расчеты проводятся до тех пор, пока не будут определены все постоянные метки для всех узлов графа, которые в нашем случае символизируют ПО. Результаты расчетов заносятся в отдельную таблицу. В ее предпоследний столбец вписываются вершины, для которых уже рассчитана постоянная метка. В последний столбец вносятся величина этой метки для каждого расчетного шага.

На этапе №1 расчета принимаем, что начальная вершина №1 (или  $x_I$ ) имеет постоянную метку  $L^*(x_I)=0$ , остальным вершинам присвоена временная метка равная  $\infty$ .

На этапе №2 рассчитывается множество значений для вершины  $U(x_l)$ :

$$U(x_1) = \{x_3, x_4, x_5, x_2\} \tag{2}$$

Затем производим перерасчет их временных меток по формуле (1). Тогда получаем:

$$L^{H}(x_3) = 85$$
  
 $L^{H}(x_4) = 75$   
 $L^{H}(x_5) = 57$   
 $L^{H}(x_2) = 32$ 

Теперь выбираем вершины  $x_2$ , которая имеет минимальную временную метку, равную 32. Эта вершина получаем постоянную метку:

$$L^*(x_2) = 32$$

Этап №3 предусматривает определение множества последователей узла графа

 $U(x_2) = \{x_3, x_5, x_8\}$ . Затем производим пересчет их временных меток по следующей формуле:

$$L^{H}(x_3) = \min\{85, 32 + 70\} = 85$$
  
 $L^{H}(x_5) = \min\{57, 32 + 23\} = 55$   
 $L^{H}(x_8) = 32 + 64 = 96$ 

По результатам расчетов выбираем вершину  $x_5$ , которая имеет минимальную временную метку 55. Этой вершине присваивается постоянная метка:

$$L^*(x_5) = 55$$

Этап №4. Выполним расчет множества последователей для узла графа  $U(x_5) = \{x_4, x_6, x_7\}$ . По формуле (1) производится пересчет временных меток:

$$L^{H}(x_4) = \min\{75, 55 + 10\} = 65$$
  
 $L^{H}(x_6) = 55 + 11 = 66$   
 $L^{H}(x_7) = 55 + 20 = 75$ 

Таким образом, выбираем вершину  $x_4$  с минимальной временной меткой, которая равна 65. После чего присваиваем ей постоянную метку:

$$L^*(x_A) = 65$$

Этап №5. Найдем множество последователей для узла графа  $U(x_4) = \{x_3\}$ . Выполним пересчет их временных меток по формуле (1):

$$L^{H}(x_3) = \min\{85, 65 + 18\} = 83$$

Затем выбираем узел графа  $x_6$  с минимальной временной меткой, которая равна 66. То есть этот узел графа получает постоянную метку:

$$L^*(x_6) = 66$$

Этап №6. Найдем множество последователей для узла графа  $U(x_6) = \{x_4, x_7\}$ . Затем выполним пересчет временных меток по формуле (1). Тогда получаем:

$$L^{H}(x_7) = \min\{75, 66 + 7\} = 73$$

После чего выбираем вершину графа  $x_7$ , которая имеет минимальную временную метку, равную 73, поэтому назначаем узлу графа  $x_7$  постоянную метку:

$$L^*(x_7) = 73$$

Этап №7. Найдем множество последователей для узла графа  $U(x_7) = \{x_8\}$ . Затем выполним пересчет их временных меток по формуле (1). Тогда получаем:

$$L^{H}(x_7) = \min\{96,73 + 12\} = 85$$

Тогда выбираем узел графа x3 с минимальной временной меткой, которая равна 83. То есть данному узлу присваивается временная постоянная метка:

$$L^*(x_3) = 83$$

Этап №8. Найдем множество последователей для узла графа  $U(x_3) = \{x_6\}$ . Этот узел графа уже имеет рассчитанную постоянную метку. В связи с этим,

выбираем последнюю вершину, которая имеет временную метку 85, которую и присваиваем этой вершине. Таким образом, ее постоянная метка

$$L^*(x_8) = 85$$

На основании проведенных расчетов графа по методу Дейстры получаем кратчайшие пути между узлами (вершинами) графа, которые символизируют наиболее эффективные взаимодействия между альтернативными САПР. Кроме того, порядок взаимодействия между вершинами графа показывает порядок взаимодействия (передачи информации) между отдельным ПО.

Наиболее эффективные пути между вершинами графа определены, и их длина дана в последних 2-х столбцах приведенной выше матрицы. Дерево кратчайших путей, то есть наиболее эффективных направлений передачи информации через выбранное ПО, которое соответствует вершинам графа, показано на рисунке 4.

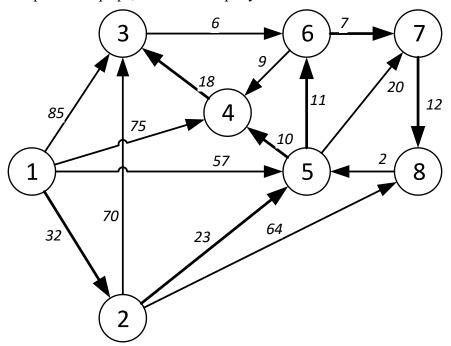


Рис. 4. Решение задачи выбора с использованием графа

**Заключение.** Таким образом, разработанный метод выбора и организации взаимодействия между несколькими специализированными программными продуктами, применяемыми для проектирования, дает возможность организовать эффективную работу специалистов при разработке цифровой модели изделия.

В соответствии с изложенным выше методологическим подходом, выбор наиболее эффективного САПР, которое используется для тех или иных функций в процессе проектирования с использованием 3D-модели, рекомендуется проводить с применением теории графов.

Метод теории графов, который является основой предложенного подхода и основным его инструментом, позволяет определить наиболее эффективные пути взаимодействия между ПО, с учетом времени, которое затрачивается пользователями на организацию этого взаимодействия. Теория графов полностью исключает использование ПО, если оно не взаимодействует или ограниченно взаимодействует с другими программными продуктами, применяемыми при выпуске проектной документации. Кроме того, использование графа в качестве основного инструмента позволяет выбрать наиболее эффективный маршрут взаимодействия, сокращающий затраты специалистов на подготовку передачи информации.

#### Список источников

- Гуськова И.В. Реинжиниринг как метод оптимизации эффективности отечественных предприятий / И.В. Гуськова, И.Д. Кузнецова // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение, 2017. № 1(49). С. 27-35.
- 2. Дутов А.В. Большие вызовы для авиации, авиастроения и развития авиационных технологий: монография / А.В. Дутов, В.В. Клочков, С.М. Рождественская. Москва: ФГУП ГосНИИАС, 2017. 124 с.
- 3. Жилина А.Д. Основные понятия и закономерности инновационного менеджмента: краткий ретроспективный анализ / А.Д. Жилина // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: экономика и право, 2014. № 9-10. С. 10-18.
- 4. Завилов И.М. Особенности стратегического управления АО «Объединенная двигателестроительная корпорация» / И.М. Завилов // Российское предпринимательство, 2016. № 24. Т. 17. С. 3633-3642.
- Кальницкая И.В. Интегрированная учетно-аналитическая система для целей управления организацией / И.В. Кальницкая // Международный бухгалтерский учет, 2014. – № 22(316). – С. 2-13.
- 6. Клочков В.В. Организационно-экономические основы обеспечения конкурентоспособности высокотехнологичных производств (на примере авиационного двигателестроения) // Диссертация на соискание ученой степени доктора экономических наук / Клочков Владислав Валерьевич; Московский физико-технический институт (государственный университет). Москва, 2007. 319 с.
- 7. Кохно П.А. Стратегическое развитие авиапрома / П.А. Кохно, А.В. Бондаренко // Информационно-аналитический журнал «Арсенал Отечества», 2020. № 2(46). URL: https://arsenal-otechestva.ru/article/1361-strategicheskoe-razvitie-aviaproma (дата обращения: 06.06.2020 г.).
- 8. Краев В.М. Подходы к разработке моделей жизненного цикла отечественной авиационной техники / В.М. Краев, М.А. Силуянова, и др. // Московский экономический журнал, 2019. № 1. С. 536-546.
- 9. Крюков О.В. Применение теории нечётких множеств при прогнозировании и обработке данных / О.В. Крюков // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ, 2016. № 1. Т. 150. С. 18-26.
- 10. Гусарова Ю.В. Анализ взаимосвязи платежеспособности и убыточности предприятий промышленности / Ю.В. Гусарова, Е.В. Лютер, А.Ю. Клоницкая // Вестник МАИ, 2008. Т. 15. № 6. С. 5-12.
- 11. Гусарова Ю.В. Совершенствование правовой и экономической базы для сокращения убыточных организаций авиационной промышленности / Ю.В. Гусарова, Е.В. Лютер, А.Ю. Клоницкая // Вестник МАИ, 2010. T. 17. № 1. C 25-29.
- 12. Гусарова Ю.В. Метод классификации предприятий промышленности по показателю налоговой нагрузки / Ю.В. Гусарова // Труды МАИ, 2010. № 38.
- 13. Гусарова Ю.В. Методы оценки финансово-экономических рисков при выполнении государственного заказа предприятиями авиационной промышленности / Ю.В. Гусарова, Е.В. Лютер, А.Ю. Клоницкая // Труды МАИ, 2010. № 37.
- 14. Быкова И.С. Автоматизированное проектирование фюзеляжа воздушного судна / И.С. Быкова, А.Д. Припадчев, А.А. Горбунов // Фундаментальные исследования, 2015. № 2-16. С. 3484-3487.
- 15. Наука Промышленность Оборона: труды XVII Всероссийской научно-технической конференции: в 4 т. / коллектив авторов; под редакцией С.Д. Саленко. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. 372 с.
- 16. Бойко А.А. Инструменты разработки ресурсной стратегии предприятия / А.А. Бойко, О.В. Вайда // Решетневские чтения, 2016. Т. 2. № 20. С. 356-357.
- 17. Алексеев В.Е. Теория графов: Учебное пособие / В.Е. Алексеев, Д.В. Захарова. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2017. 119 с.
- 18. Алексеев В.Е. Графы. Модели вычислений. Алгоритмы / В.Е. Алексеев, В.А. Таланов. Нижний Новгород:  $HH\Gamma Y$ , 2005. 307 с.

**Говорков Алексей Сергеевич.** К.т.н., директор, Институт информационных технологий и анализа данных им. Е.И. Попова ФГБОУ ВО Иркутский национальный исследовательский технический университет. AuthorID: 667979, SPIN: 4791-7021, ORCID: 0000-0001-9684-8572, govorkov\_as@ex.istu.edu. 664074 Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

**Короткова Ксения Евгеньевна.** Соискатель, Институт информационных технологий и анализа данных им. Е.И. Попова ΦΓБОУ ВО Иркутский национальный исследовательский технический университет. AuthorID: 1123771, SPIN: 1893-6701, KorotkovaKE@enplus-telecom.ru. 664074 Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

UDC 658.5.012.011.56

DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.014

## Improving methods for selecting CAD systems when developing an object digital model

### Aleksey S. Govorkov, Kseniya E. Korotkova

National research Irkutsk state technical university,

Russia, Irkutsk, govorkov\_as@ex.istu.edu

**Abstract.** The computer-aided design (CAD) system used at an enterprise to create a digital model of structures or products is a set of several software products, each of which defines strictly defined functions as part of the enterprise's production system.

A rational choice of CAD begins at the stage of preparation for creating a digital model. The choice should take into account: the software (SW) required for 3D modeling of the finished object, as well as the final software intended for printing the entire set of design documentation, or for generating an electronic set of documentation for sending to the customer.

In the context of sanctions from foreign countries, it is necessary to approach the selection of software products, taking into account all their features, advantages and functionality. In addition, it is necessary to consider the possibility of organizing technical support for these software products, as well as their adaptation to the domestic software that is used to compile auxiliary documents included in the design documentation set.

For the effective organization of work between individual software in order to enable their interaction with each other, it is necessary to develop a methodology that would reduce the interaction time and implement interaction mechanisms. These mechanisms provide for the transfer of information from one software package to another for the purpose of processing information and automatic generation of additional documents (estimates, statements of work volumes, specifications, etc.).

In this regard, the development of a new method for selecting CAD and the formation of basic principles for information transfer is very relevant.

Keywords: software, compatibility, graph, database, functionality, method

#### References

- 1. Guskova I.V., Kuznetsova I.D. Reinzhiniring kak metod optimizatsii effektivnosti otechestvennykh predpriyatiy [Reengineering as a method for optimizing the efficiency of domestic enterprises]. Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Regional'noe prilozhenie [Modern high technologies. regional application], 2017, no. 1(49), pp. 27-35.
- 2. Dutov A.V., Klochkov V.V., Rozhdestvenskaya S.M. Bol'shie vyzovy dlya aviatsii, aviastroeniya i razvitiya aviatsionnykh tekhnologiy [Big challenges for aviation, aircraft construction and development of aviation technologies]. Moscow, FGUP GosNIIAS Publ., 2017, 124 p.
- 3. Zhilina A.D. Osnovnye ponyatiya i zakonomernosti innovatsionnogo menedzhmenta: kratkij retrospektivnyj analiz [Basic concepts and patterns of innovation management: a brief retrospective analysis]. Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: ekonomika i pravo [Modern science: actual problems of theory and practice. series: economics and law], 2014, no. 9-10, pp. 10-18.
- 4. Zavilov I.M. Osobennosti strategicheskogo upravleniya AO "Ob'edinennaya dvigatelestroitel'naya korporaciya" [Features of strategic management of JSC "United Engine Corporation"]. Rossijskoe predprinimatel'stvo [Russian journal of entrepreneurship], 2016, vol. 17, no. 24, pp. 3633-3642.
- 5. Kal'nitskaya I.V. Integrirovannaya uchetno-analiticheskaya sistema dlya celej upravleniya organizaciej [Integrated accounting and analytical system for organizational management purposes]. Mezhdunarodnyj bukhgalterskij uchet [International accounting], 2014, no. 22(316), pp. 2-13.
- 6. Klochkov V.V. Organizacionno-ekonomicheskie osnovy obespecheniya konkurentosposobnosti vysokotekhnologichnykh proizvodstv (na primere aviacionnogo dvigatelestroeniya) [Organizational and economic foundations for ensuring the competitiveness of high-tech industries (on the example of aircraft engine building)]. Doctor of Sciences (Economics) dissertation. Moscow, MFTI, 2007, 319 p.
- 7. Kokhno P.A., Bondarenko A.V. Strategicheskoe razvitie aviaproma [Strategic development of the aviation industry]. Informatsionno-analiticheskij zhurnal "Arsenal Otechestva" [Information and Analytical Journal "Arsenal of the Fatherland"], 2020, no. 2(46), available at: https://arsenal-otechestva.ru/article/1361-strategicheskoe-razvitie-aviaproma (accessed: 06/06/2020).

- 8. Kraev V.M., Siluyanova M.A. i dr. Podkhody k razrabotke modelei zhiznennogo tsikla otechestvennoi aviatsionnoi tekhniki [Approaches to the development of life cycle models for domestic aviation equipment]. Moskovskii ekonomicheskii zhurnal [Moscow economic journal], 2019, no. 1, pp. 536-546.
- 9. Kryukov O.V. Primenenie teorii nechetkikh mnozhestv pri prognozirovanii i obrabotke dannykh [Application of fuzzy set theory in forecasting and data processing]. Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEM [Questions of electromechanics. Proceedings of VNIIEM], 2016, vol. 150, no. 1, pp. 18-26.
- 10. Gusarova Yu.V., Lyuter E.V., Klonitskaya A.Yu. Analiz vzaimosvyazi platezhesposobnosti i ubytochnosti predpriyatij promyshlennosti [Analysis of the relationship between solvency and unprofitability of industrial enterprises]. Vestnik MAI [MAI Bulletin], 2008, vol. 15, no. 6, pp. 5-12.
- 11. Gusarova Yu.V., Lyuter E.V., Klonitskaya A.Yu. Sovershenstvovanie pravovoj i ekonomicheskoj bazy dlya sokrashcheniya ubytochnykh organizatsij aviatsionnoj promyshlennosti [Improving the legal and economic framework for reducing unprofitable organizations in the aviation industry]. Vestnik MAI [MAI Bulletin], 2010, vol. 17, no. 1, pp. 25-29.
- 12. Gusarova Yu.V. Metod klassifikatsii predpriyatij promyshlennosti po pokazatelyu nalogovoj nagruzki [Method for classifying industrial enterprises by tax burden indicator]. Trudy MAI [Proceedings of MAI], 2010, no. 38.
- 13. Gusarova Yu.V., Lyuter E.V., Klonitskaya A.Yu. Metody otsenki finansovo-ekonomicheskikh riskov pri vypolnenii gosudarstvennogo zakaza predpriyatiyami aviatsionnoj promyshlennosti [Methods for assessing financial and economic risks in the execution of state orders by aviation industry enterprises]. Trudy MAI [Proceedings of MAI], 2010, no. 37.
- 14. Bykova I.S., Pripadchev A.D., Gorbunov A.A. Avtomatizirovannoe proektirovanie fyuzelyazha vozdushnogo sudna [Automated design of aircraft fuselage]. Fundamental'nye issledovaniya [Fundamental research], 2015, no. 2-16, pp. 3484-3487.
- 15. Nauka Promyshlennost' Oborona: trudy XVII Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii: v 4 t. [Science Industry Defense: proceedings of the XVII All-Russian scientific and technical conference: in 4 volumes]. Ed. by S.D. Salenko. Novosibirsk, Izd-vo NGTU Publ., 2016, 372 p.
- 16. Boiko A.A., Vaida O.V. Instrumenty razrabotki resursnoi strategii predpriyatiya [Tools for developing a resource strategy for an enterprise]. Reshetnevskie chteniya [Reshetnev readings], 2016, vol. 2, no. 20, pp. 356-357.
- 17. Alekseev V.E., Zakharova D.V. Teoriya grafov: Uchebnoe posobie [Graph Theory: Textbook]. Nizhnij Novgorod, Nizhegorodskij gosuniversitet Publ., 2017, 119 p.
- 18. Alekseev V.E., Talanov V.A. Grafy. Modeli vychislenij. Algoritmy [Graphs. Calculation Models. Algorithms]. Nizhnij Novgorod, NNGU Publ., 2005, 307 p.

Govorkov Aleksey Sergeevich. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Institute of Information Technologies and Data Analysis named after. E.I. Popova, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Irkutsk National Research Technical University. AuthorID: 667979, SPIN: 4791-7021, ORCID: 0000-0001-9684-8572, govorkov\_as@ex.istu.edu. 664074, Irkutsk, Lermontov street 83.

Korotkova Kseniya Evgen'evna. Scientific degree applicant of the Institute of Information Technologies and Data Analysis named after. E.I. Popova, Irkutsk National Research Technical University. AuthorID: 1123771, SPIN: 1893-6701, KorotkovaKE@enplus-telecom.ru. 664074 Irkutsk, Lermontov street 83.

Статья поступила в редакцию 28.04.2025; одобрена после рецензирования 23.07.2025; принята к публикации 08.10.2025.

The article was submitted 04/28/2025; approved after reviewing 07/23/2025; accepted for publication 10/08/2025.

УДК 613.865:159.9.078

DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.015

# **Технология применения нейросети и программирования чат-бота для определения параметров психологического здоровья**

## Борисенко Юлия Вячеславовна<sup>1</sup>, Борисенко Владислав Игоревич<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Кемеровский государственный университет, Россия, Кемерово, *evseenkova@mail.ru* <sup>2</sup>Национальный исследовательский университет ИТМО, Россия, Санкт-Петербург

Аннотация. Вопросы психического и психологического здоровья, как взрослых, так и детей, и подростков, приобретают особую актуальность в современном мире. Урбанизация, ускорение темпов жизни, цифровизация общения, медиатизация образовательной среды и повышение требований к объему обрабатываемой информации обучающимися современных образовательных организаций оказывают влияние на их эмоциональное состояние, что может приводить к различным эмоциональным расстройствам, отсутствие которых является одним из критериев психологического здоровья. В статье представлены результаты разработки и программирования чат-бота для диагностики параметров психологического здоровья респондента. Для этого нейросеть была обучена распознаванию признаков депрессивных, тревожных или агрессивных тенденций собеседника в диалоге. В каждом случае предлагается свой вариант диагностического инструментария и рекомендаций для собеседника. Далее был разработан telegram-бот для определения в процессе общения признаков депрессии, аутоагрессии или тревоги в высказываниях респондента. При выявлении признаков риска чат-бот предлагает ответить на ряд вопросов и при информированном согласии пройти психологический тест. Для этого на основе объектно-ориентированного программирования был разработан класс – психологический тест, загружены несколько психологических тестов: Шкала депрессии А. Бека; Шкала тревоги А. Бека; Опросник ауто- и гетероагрессии Е. П. Ильина. Для общения с пользователем используется нейросеть GigaChat от компании «Сбер». Программы были написаны на языке Python, использовались модули PyTelegramBotAPI, Numpy, SciKit-learn, Joblib, Gensim, JSON, GigaChatAPI, TensorFlow, SQLAlchemy. Данная программа может быть использована образовательными организациями для мониторинга параметров эмоционального состояния обучающихся.

**Ключевые слова:** нейросеть, обучение нейросети, чат-бот, психологическое здоровье, депрессия, тревога, агрессия

**Цитирование:** Борисенко Ю.В. Технология применения нейросети и программирования чат-бота для определения параметров психологического здоровья / Ю.В. Борисенко, В.И. Борисенко // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. — № 4(40). — С.187-199. — DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.015.

**Введение.** В современном мире различные нарушения психического и психологического здоровья являются одной из самых частых причин нетрудоспособности. Кроме того, недиагностированные проблемы психологического здоровья создают угрозу для здоровья и жизни человека.

В связи с высоким ритмом жизни люди редко обращают внимание на своё здоровье, при этом переход общения в цифровую среду, обедняющий эмоциональный контакт, стресс и отсутствие поддержки приводят к увеличению количества различных нарушений психологического здоровья, таких как депрессия, тревога, аутоагрессивные тенденции.

**1.** Состояние проблемы изучения параметров психологического здоровья. Психическое здоровье обычно определяется, как состояние психического благополучия, которое позволяет людям справляться со стрессовыми ситуациями в жизни, реализовывать свой потенциал, успешно учиться и работать, а также вносить вклад в жизнь общества [1, 2].

Существует также термин «психологическое здоровье». Понятие «психическое» и «психологическое» здоровье взаимосвязаны между собой. Обычно термин «психическое здоровье» используется, когда речь идет о механизмах психики, в то время как «психологическое здоровье» используется тогда, когда речь идет о личности в целом [3].

Параметры психического и психологического здоровья различаются. К признакам психологического здоровья относят соматическое здоровье, адекватное реагирование на различные жизненные ситуации, понимание реальных и идеальных целей и умение выстроить поведение в рамках социальных норм [3].

К параметрам психического здоровья относят отсутствие болезненных признаков и расстройств, таких, как: поведенческие нарушения (деструктивное поведение, синдром дефицита внимания), рискованные формы поведения (аддикции и рискованное сексуальное поведение), расстройства пищевого поведения (такие, как: нервная анорексия или булимия), а также психотические расстройства (включающие такие симптомы, как бред и/или галлюцинации) и попытки суицида и/или самоповреждения (факторы риска которых: жестокое обращение в детстве, употребление алкоголя и доступность средств суицида), и эмоциональные расстройства [2, 4].

Таким образом, эмоциональные трудности могут быть, в зависимости от тяжести проявлений, параметрами психологического и (при тяжелых нарушениях) психического здоровья. В современном мире самыми широко распространенными являются следующие эмоциональные расстройства: тревожные расстройства (например, паника, чрезмерное беспокойство) и депрессивные расстройства. Эмоциональные расстройства опасны из-за быстрых, неожиданных изменений настроения [5]. Подобные расстройства сопряжены с нарушениями социальной адаптации личности, что приводит к социальной отчужденности, которая усугубляет изоляцию и ощущение одиночества [5].

Депрессия является одним из самых распространенных эмоциональных расстройств, которое характеризуется состоянием пониженной жизненной активности, потерей интереса к обычным делам, нарушением сна и аппетита, а также снижением самооценки и нарушением когнитивных функций [6]. Диагностика депрессии является важной задачей в области психологического здоровья, так как депрессия может быть связана с суицидальными тенденциями, рисками нарушения соматического здоровья [7, 8].

Согласно Всемирной Организации Здравоохранения (ВОЗ), недостаточность оказания помощи при эмоциональных проблемах определяет необходимость расширения масштабов помощи, в том числе в рамках неспециализированного психологического консультирования или самодиагностики и самопомощи с использованием возможностей цифровой среды [1].

При этом далеко не всегда человек осознает, что ему требуется помощь. Для того, чтобы снизить риски, ВОЗ рекомендует обратиться к технологиям, имеющимся в доступе у любого человека и позволяющим быстро определить, требуется ли ему помощь. Кроме того, использование различных цифровых помощников или программ, курирующих самопомощь, позволяют контролировать проявления различных эмоциональных трудностей и способствуют повышению уровня психологического благополучия [2].

образовательном пространстве современном особо актуальны вопросы психологического благополучия учащихся, так как в условиях ускорения темпа жизни [9], повышения требований к объему обрабатываемой информации обучающимися современных образовательных организаций [8, 10], медиатизации [11] и информатизации [12-14] образовательной среды эмоциональные переживания учащихся не всегда ими понимаются [15], осознаются, рефлексируются, а, следовательно, эмоциональные проблемы часто остаются без внимания родителей и педагогов и хронифицируются. Цифровые средства общения (социальные сети), с одной стороны, интенсифицируют бизнес-процессы [16], позволяют решить многие медицинские вопросы [17], например, в реабилитации постинсультных пациентов [18], облегчают многие аспекты коммуникации, в том числе в образовательном процессе [13], а с другой – создают риски для развития эмпатии, умения распознавать эмоции (свои и чужие), навыков поддержания внимания собеседника [6]. Такие коммуникационные сложности вызывают эмоциональное напряжение не только у детей и подростков, но и у взрослых [19]. Эмоциональное напряжение в сочетании с прочими факторами рисков, как личностными, так и социальными и ситуативными, создают предпосылки для нарушений психологического и психического здоровья личности.

Из всех параметров, нарушение которых характеризует нарушение психологического здоровья, эмоциональные расстройства менее всего могут проявляться вовне и могут быть долго не диагностированы. Это может создавать риски для здоровья и жизни человека [9]. Поэтому авторы в своей работе сосредоточились на определении таких параметров психологического здоровья, как эмоциональные расстройства, а именно, депрессия и тревожные расстройства. Помимо эмоциональных расстройств, значительный риск для здоровья и жизни человека создает предрасположенность к суициду, поэтому авторы включили в свою работу и анализ параметра аутоагрессии.

**2.** Научная новизна и возможности применения нейросети. В этой связи важно, что в современных условиях цифровой среды для оценки эмоционального состояния респондента можно использовать текстовую информацию, полученную в результате диалога с ним [20].

Таким образом, мы можем использовать чат-бот в целях определения параметров эмоциональных трудностей [21, 22]. С помощью чат-бота можно настроить диалог с человеком и помочь ему определить, требуется ли ему срочная помощь [23]. Для определения выбранных нами параметров психологического здоровья, нарушение которых требует максимально быстрого реагирования и помощи, мы использовали надежные и проверенные диагностические методики: для диагностики депрессии — Шкала депрессии А. Бека (Веск Depression Inventory — ВDI) [24] в адаптации Н. В. Тарабриной [25], для диагностики тревоги — Шкала тревоги А. Бека (Веск Anxiety Inventory, ВАІ) [26] в адаптации Н. В. Тарабриной [25] и для диагностики аутоагрессии — Опросник «Ауто- и гетероагрессия» Е. П. Ильина [27].

Перспективным методом определения признаков тревоги или депрессии является использование нейронных сетей. Нейронные сети могут выявлять сложные паттерны и зависимости, что позволяет использовать их для анализа и предсказания различных феноменов [28, 29]. В последние годы появился ряд исследований, посвященных использованию нейросетевых моделей для диагностики депрессии [30]. В современном мире разработка и применение нейросетей и чатботов для взаимодействия с клиентом достаточно распространены. Однако, в нашей работе нейросеть была обучена не только применять диагностические методики, но и определять в диалоге вероятность риска эмоциональных трудностей у собеседника через анализ его высказываний.

Обученная нейросеть может классифицировать высказывания собеседника, как депрессивные, тревожные или аутоагрессивные или как высказывания с отсутствием признаков депрессии, агрессии или тревоги [31, 32]. В итоге использование нейросетевых моделей для определения депрессии может значительно улучшить процесс обнаружения [33] и поисков способов улучшения состояния собеседника этого расстройства [34]. В работе авторов, если нейросеть распознаёт признаки депрессии в диалоге с собеседником, чат-бот предлагает пройти тест «Шкала депрессии» А. Бека в режиме диалога. Также при распознавании признаков тревоги используется «Шкала тревоги» А. Бека, а при распознавании признаков аутоагресии — Опросник «Ауто- и гетероагрессия» Е. П. Ильина. Следует учитывать, что использование нейросетей не является точным методом определения депрессии, аутоагресии или тревоги, имеет рекомендательный характер и должно быть дополнено другими методами, такими, как обследование специалистами. Поэтому при высоких показателях в результатах теста система рекомендует обратиться к специалисту.

Таким образом, использование нейросетей для определения признаков агрессии, тревоги или депрессии является перспективным направлением исследований, которое может помочь раньше диагностировать проблему и улучшить качество жизни людей с эмоциональными трудностями.

Аналогами авторского продукта являются сайты с психологическими тестами, но, в отличие от них, система авторов будет общаться с респондентом, предлагать ему тест, основываясь на анализе его высказываний. Кроме того, разработанный авторами чат-бот предлагает интерпретацию данных и рекомендации по обращению к конкретному специалисту или небольшие рекомендации по снижению напряженности при конкретных состояниях (тревога, депрессия, агрессия) [35, 36]. Единственными близкими аналогами являются бот для оценки тревоги и депрессии Минздрава и бот «Анти-депрессия». Однако первый в большей степени рассчитан на сбор сведений для их дальнейшего анализа в научных целях, а не для частного использования. Второй работает только с депрессией.

Сравнение аналогов с указанием преимуществ предлагаемого авторами решения представлено в таблице 1.

**Таблица 1.** Сравнительная таблица аналогов с указанием преимуществ предлагаемого решения

Аналоги/ Параметр ы срав- нения	Валид- ность и надеж- ность тестов*	Диагности- руемые параметры	Возмо- жность обще- ния	Интеллекту- альное пред- ложение тес- та на основе анализа выс- казываний респондента	Понятность интерпрета- ции**	Рекомен дации	Быстрота и легкость доступа**
https://test ometrika.c om/	+/-	Разные, но нужно знать, что искать	-	-	+	+	+
https://ww w.psycholo gies.ru/	-	Разные, но нужно знать, что искать	-	-	+/-	+/-	+
https://onli netestpad. com/	+	Разные, но нужно знать, что искать	-	-	+/-	1	+
https://psy tests.org/	+	Разные, но нужно знать, что искать	-	ı	+/-	-	+
https://zig mund.onli ne/	+/-	Разные, но нужно знать, что искать	-	-	+	-	+
Бот для оценки тревоги и депрессии Мин- здрава <sup>1</sup> «Анти-	+	Депрессия	+	- +/-	-	-	+

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> https://t.me/MinzdravImmunityPollBot

-

депрес- сия» iCognito <sup>2</sup>							
Телефон доверия	-	Разные, живое общение	+	-	+	+	-
Прототип авторов	+	Депрессия Агрессия Тревога	+	+	+	+	+

<sup>\*</sup> определялись по [37]

Исходя из результатов сравнения, прототип авторов может занять свободную нишу в сегменте доступной и качественной первичной психологической помощи.

Таким образом, изучив литературу по проблеме определения признаков нарушений психологического здоровья в текстовых сообщениях, авторы определили цель работы — разработка чат-бота с использованием нейросети для определения признаков нарушений эмоционального компонента психологического здоровья (тревоги, агрессии, депрессии). Авторы предполагают, что чат-бот может быть использован для определения параметров эмоционального компонента психологического здоровья.

**3. Методика.** Методы работы: теоретические (анализ литературы по проблеме), эмпирические (программирование, прототипирование).

Целевой аудиторией авторского проекта являются все взрослые и подростки (для детей необходимо использовать другие диагностические методики), а также при необходимости проект можно модифицировать под конкретные цели кризисных центров, оказывающих экстренную психологическую помощь. В дальнейшем возможно сотрудничество с онлайн-платформами с записью к психологам.

В работе были использованы следующие материалы и оборудование:

- 1. Программы написаны на языке Python, использовались модули PyTelegramBotAPI, Numpy, SciKit-learn, Joblib, Gensim, JSON, GigaChatAPI, TensorFlow, SQLAlchemy.
- 2. Разработка велась в среде Google Colab и Visual Studio Code.
- 3. Для ведения диалога с пользователем была выбрана модель GigaChat от компании «Сбер» (выбранная после анализа доступности использования аналогов), для хранения данных использовалась база данных на SQLite (так как в рамках прототипа не требовалось хранить большой объем информации).
- 4. Результаты. Для обучения модели использовался датасет, собранный с данных социальной сети Reddit, содержащий 48000 записей пользователей, отмеченных, как «Депрессивные» и «Недепрессивные». Разбиение на обучающую и тестовую выборки: 80%-20%. Для того, чтобы нейросеть могла обрабатывать текст, записи из датасета были векторизованы для дальнейшей работы с ними: каждое слово в записи было преобразовано в многомерный вектор. Для предобработки данных использовался векторизатор для текста из модуля SciLit-learn sklearn.feature\_extraction.text.TfidfVectorizer. Кроме того, для увеличения точности, были удалены характерные стоп-слова, которые не несут смысловую нагрузку, но добавляют объем данных для обработки, снижая точность анализа. Были обучены модели на SciKit-learn и Tensorflow. На рисунке 1 представлена матрица несоответствий для модели sklearn.naive\_bayes.MultinomialNB. Точность для модели SciKit-

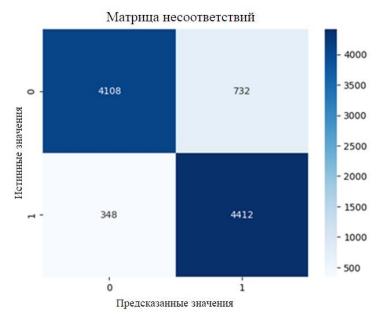
<sup>\*\*</sup> на основе оценок 30 испытуемых, не имеющих психологического образования. + интерпретация понятна 70-100%, +- 40-69%, - менее 40% испытуемых

<sup>\*\*\*</sup> на основе экспертных оценок 30 испытуемых. + легкодоступен для более 50% испытуемых.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> https://icognito.app/depression

learn 0,89. Так как авторы использовали готовый классификатор, архитектура не представлена.

На рисунке 2 изображена архитектура модели на TensorFlow. Параметры TensorFlow-модели: точность: 0,89. На рисунке 3 представлена матрица несоответствий для TensorFlow-модели.



**Рис. 1.** Матрица несоответствий для модели SciKit-learn (количество примеров)

INPUT		
Dense, 32, (5000,) Relu		
Dense, 16 Relu		
Dense, 1 Sigmoid		
OUTPUT		

Puc. 2. Архитектура TensorFlow-модели

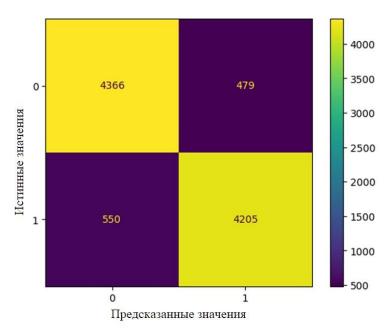


Рис. 3. Матрица несоответствий для TensorFlow-модели

Авторы выбрали модель на sklearn.naive\_bayes.MultinomialNB, так как она показала более высокую точность, а также меньшее количество ложноотрицательных ответов (т.е.

меньшее количество тестовых случаев с депрессией определила, как нормальные). Далее был разработан telegram-бот, который может поддерживать диалог, определять признаки депрессии, предлагать психологические тесты. Для общения с пользователем используется нейросеть GigaChat от компании «Сбер». Таким образом, авторы выбрали модель для ведения диалога с пользователем.

При выявлении признаков нарушений эмоциональной сферы чат-бот предлагает пройти психологический тест. Для этого на основе объектно-ориентированного программирования был разработан класс — психологический тест, загружены несколько психологических тестов: «Шкала депрессии» А. Бека; «Шкала тревоги» А. Бека; Опросник «Ауто- и гетероагрессия» (Е. П. Ильин).

Для определения того, какой именно тест нужно предложить пользователю, происходит расчёт косинусных расстояний между векторизованными сообщениями пользователя и списками слов, характерных для агрессии, депрессии и тревоги (разработанный с помощью опроса 10 экспертов-психологов). Кроме того, пользователь может сам специально пройти тест.

Авторами была создана база данных на SQLite с помощью модуля SQLAlchemy с одной таблицей, в которой хранятся записи о пользователях: ID пользователя, Telegram ID, количество обнаруженных сообщений с признаками депрессии, номер теста, который проходит пользователь, а также история последних сообщений, для контекста для модели GigaChat.

Дополнительно авторами была добавлена возможность распознавания голосовых сообщений респондента. Для этого использовались модули speech\_recognition и Google Speech Recognition. Голосовые сообщения преобразуются в текст. Далее они анализируются, как текстовые сообщения, для выявления симптомов агрессии, депрессии или тревоги.

После анализа высказываний авторский чат-бот предлагает респонденту пройти надежный тест для определения состояния и дальнейших рекомендаций. После прохождения теста пользователь получает результат, и, согласно результатам, бот предлагает обратиться к специалисту.

Таким образом, авторы собрали датасет, обучили на нём модель, а также разработали первичный интерфейс для программы и провели тестирование чат-бота.

**5. Обсуждение результатов**. Авторами разработан чат-бот на языке Python с использованием модуля PyTelegramBotAPI, который может поддерживать диалог с пользователем, благодаря нейросети GigaChat от компании «Сбер», и определять, В высказываниях собеседника депрессивные, присутствуют ЛИ тревожные аутоагрессивные признаки с помощью авторской модели на SciKit-learn, обученной на собранном датасете. Основные затраты на реализацию проекта – содержание сервера, а также оплата GigaChat API. В дальнейшем авторы планируют поиск инвесторов для реализации данного проекта. На данный момент авторский прототип работоспособен (обученная модель, программа для определения параметров психологического здоровья, чатбот). Результаты авторов согласуются с разработками коллег, использующих нейросети для диагностики эмоциональных состояний [30, 31, 33], что расширяет возможности использование чатботов, уже применяемых в области технологий [38, 39], медицины [18] и образования [40, 41]. Перспективность дальнейших разработок в области психологического здоровья связана с актуальным социальным запросом современной психологической и образовательной практики [42, 43]. Однако, авторы полагают, что, помимо различных аспектов психологического здоровья, можно изучать и параметры психического здоровья, к которым относят отсутствие болезненных признаков и эмоциональных расстройств [6], и таких признаков, как: поведенческие нарушения (деструктивное поведение, синдром дефицита внимания), рискованные формы поведения (аддикции и рискованное сексуальное поведение), расстройства пищевого поведения (такие, как нервная анорексия или булимия), а также психотические расстройства (включающие такие симптомы, как бред и/или галлюцинации) и попытки суицида и/или самоповреждения (факторы риска которых: жестокое обращение в детстве, употребление алкоголя и доступность средств суицида). Дальнейшие разработки авторского прототипа могут быть направлены на включение дополнительных диагностических критериев психического здоровья в репертуар коммуникативных возможностей чат-бота.

При использовании представленного чат-бота на случайной выборке, построенной по методу снежного кома, (возраст от 14 до 62) в общении с ботом были выявлены риски в 71% случаев. При этом из всех испытуемых, которым бот предложил тесты, 20% отказались от похождения диагностики. Среди лиц, прошедших предложенную диагностику, была выявлена тревога у 22%, риск депрессии у 17%, риски агрессии 20%.

В качестве ограничений работы можно отметить, что в связи с недостатком данных (датасетов) на русском языке по агрессии и тревоге модель обучалась на датасете по депрессии. Для дальнейшего совершенствования работы прототипа авторы планируют использовать большую языковую модель для более точного анализа высказываний пользователя. Планируется усовершенствование системы распознавания с расширением списка показателей до всех параметров психического и психологического здоровья, выделяемых ВОЗ. Кроме того, разработанный авторами алгоритм можно применить для анализа записей людей в социальных сетях. Также в дальнейшем возможно сотрудничество с онлайн-платформами с записью к психологам. При заинтересованности родителей авторская программа с небольшими изменениями (набор диагностических методик необходимо изменить на подходящие по возрасту, если участвовать будут дети младше 14 лет) может быть использована образовательными организациями для мониторинга состояния обучающихся в привычной (учитывая широту онлайн-общения современных детей и подростков) и удобной для них форме.

Заключение. Таким образом, применение нейросети для определения параметров психологического здоровья включает использование двух нейросетей: готовой большой языковой модели для ведения диалога с пользователем в чате и собственной специально обученной модели-классификатора для анализа высказываний пользователя. Она определяет признаки рисков нарушений параметров психологического здоровья в высказываниях респондентов и предлагает пройти диагностические тесты через чат-бот, то есть, чат-бот с использованием нейросетей может быть эффективен для определения параметров психологического здоровья.

Конфликт интересов в связи с описанными в статье данными отсутствует. Авторы выражают благодарность всем участникам исследования.

### Список источников

- 1. Психическое здоровье (Всемирная организация здравоохранения). URL:https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/mental-health-strengthening-our-response (дата обращения: 15.07.2025).
- 2. Comprehensive mental health action plan 2013–2030. Geneva: World Health Organization; 2021. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO, available at: https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/345301/9789240031029-eng.pdf?sequence=1 (accessed: 07/06/2025).
- 3. Ананьев В.А. Психология здоровья / В.А. Ананьев. СПб: Питер, 2006. 384 с.
- 4. Лебедева О. В. Проблема соотношения понятий "психическое здоровье" и "психологическое здоровье" в отечественной и зарубежной психолого-педагогической литературе / О.В. Лебедева // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2013. № 3-1. С. 33-37.
- 5. Ерофеева М.А. Психическое здоровье как психологическая категория: сущность и границы понятия / М.А. Ерофеева, А.А. Зуйкова // Формирование здорового образа жизни: учебное пособие / Государственный социально-гуманитарный университет. КОЛОМНА: Государственное

- образовательное учреждение высшего образования Московской области "Государственный социальногуманитарный университет", 2020. С. 4-15.
- 6. Волгина Т. Л. Психическое здоровье студента и курсанта основа психического здоровья нации: опыт, перспективы / Т.Л. Волгина, С.Н. Бакшутов, Н.Р. Овчинникова // Вопросы психического здоровья детей и подростков, 2017. Т. 17. № S2. С. 45-46.
- 7. Джамантаева М Ш. Некоторые аспекты психического здоровья / М Ш. Джамантаева, Н И. Распопова // Вестник КазНМУ, 2016. №1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/nekotorye-aspekty-psihicheskogo-zdorovya (дата обращения: 06.02.2025).
- 8. Дейч Р. В. Полипрофессиональный подход в терапии подростковых депрессий: опыт клиники кризисной помощи / Р.В. Дейч // Психическое здоровье, 2024. Т. 19. № 5. С. 62-64.
- 9. Белоус О.В. Психологическое здоровье в аспекте экологии личности / О.В. Белоус // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Познание, 2020. № 7. С. 38-42. DOI:10.37882/2500-3682.2020.07.03.
- 10. Алиева М. В. Чат-боты в электронном обучении: новые возможности и вызовы / М.В. Алиева, М.Р. Тасуева, Э.Ф. / Амирова / Журнал прикладных исследований, 2023. №6. EDN: BFRCUK.
- 11. Кузьмина Э.В. Цифровая среда: текущее состояние и перспективы / Э.В. Кузьмина, В.В. Салий, Н.В. Третьякова, и др. Краснодар: ИП Кабанов В.Б. (издательство "Новация"), 2024. 121 с.
- 12. Резаев А.В. Chatgpt и искусственный интеллект в университетах: какое будущее нам ожидать? / А.В. Резаев, Н.Д. Трегубова // Высшее образование в России, 2023. №6. DOI:10.31992/0869-3617-2023-32-6-19-37.
- 13. Глотова М.Ю. Перспективы внедрения чатботов в образование / М.Ю. Глотова, Е.А. Самохвалова // Школа будущего, 2020. № 4. С. 72-87.
- 14. Мнацаканян В.В. Разработка функционального чат-бота как способ обучения программированию школьников / В.В. Мнацаканян, В.А. Малофеев, Е.Р. Чеботарева // Наука. Управление. Образование. РФ. 2023. № 2(10). С. 60-64.
- 15. Нартова-Бочавер С.К. Ситуационно-событийный подход к пониманию психологического благополучия/неблагополучия студенческой молодежи / С. К. Нартова-Бочавер, Э. Н. Ходаковская, В. Ю. Юрчук // Современная зарубежная психология, 2024. Т. 13. № 4. С. 41-50. DOI 10.17759/jmfp.2024130404.
- 16. Ермилов Д.И. СНАТ GPT: новая технология общения с клиентами в банковской сфере / Д.И. Ермилов // Финансовые рынки и банки, 2023. №7. С. 18-22. EDN:IWGGEZ
- 17. Пашкин С.Б. Система мероприятий психологической помощи военнослужащим в интересах укрепления, сохранения, восстановления психического здоровья / С.Б. Пашкин, А.С. Турчин, Е.А. Саркисова // Вестник Санкт-Петербургского военного института войск национальной гвардии, 2020. № 1 (10). С. 82-88.
- 18. Назметдинова Д.Г. Особенности когнитивной и эмоционально-волевой сфер пациентов с постинсультными неврологическими нарушениями на разных этапах восстановительного лечения / Д.Г. Назметдинова, В.Б. Обуховская // Психолог, 2020. № 1. С. 9-15. DOI:10.25136/2409-8701.2020.1.31680.
- 19. Никитина Е.А. Факторы психологического благополучия женщин разного возраста / Е.А. Никитина // Онто- и субъектогенез психического развития человека. Москва: Институт психологии РАН, 2022. С. 209-219.
- 20. Браницкий А.А. Определение психического состояния пользователей социальной сети REDDIT на основе методов машинного обучения / А.А. Браницкий, Я.Д. Шарма, И.В. Котенко, и др. // Информационно-управляющие системы, 2022. №1 (116). DOI: 10.31799/1684-8853-2022-1-8-18.
- 21. Вольников М.С. Обзор существующих решений чат-ботов, использующих искусственные нейронные сети: их возможности, преимущества и недостатки / М.С. Вольников, Е.А. Данилов // Современные информационные технологии, 2024. № 39(39). С. 9-15.
- 22. Кисельникова Н.В. Выявление информативных параметров поведения пользователей социальной сети вконтакте как признаков депрессии / Н.В. Кисельникова, М.А. Станкевич, М.М. Данина, и др. // Психология. Журнал ВШЭ, 2020. №1. DOI:10.17323/1813-8918-2020-1-73-88
- 23. Копытова А.В. Лингвопрагматические особенности ситуации общения «человек чат-бот» / А.В. Копытова // Человек: Образ и сущность. Гуманитарные аспекты, 2023. №2 (54). DOI: 10.31249/chel/2023.02.07.
- 24. Beck A.T., Ward C.H., Mendelson M., et al. An inventory for measuring depression. Archives of general psychiatry, 1961, no. 4(6), pp.561–571, DOI:10.1001/archpsyc.1961.01710120031004.

- 25. Одинцова М.А. Психология стресса: учебник и практикум для вузов / М. А. Одинцова, Н. Л. Захарова. Москва: Издательство Юрайт, 2025. 291 с. URL:https://urait.ru/bcode/561139 (дата обращения: 25.02.2025).
- 26. Beck A.T., Epstein N., Brown G., et al. An inventory for measuring clinical anxiety: Psychometric properties. Journal of consulting and clinical psychology, 1988, no. 56(6), pp. 893-897, DOI:10.1037/0022-006X.56.6.893.
- 27. Ильин, Е. П. Психология индивидуальных различий. СПб.: Питер, 2004. 701 с.
- 28. Vandana, Marriwala N., Chaudhary D.A hybrid model for depression detection using deep learning. Measurement: Sensors, 2023, vol. 25, p. 100587, DOI:10.1016/j.measen.2022.100587.
- 29. Ridlan A., Hasanudin M., Da Costa Tavares O.C., et al. Early autism disorder prediction using machine learning. International journal of open information technologies, 2025, no. 1, DOI:10.3390/diagnostics15151859
- 30. Chiong R., Budhi G. S., Dhakal, S., et al. A textual-based featuring approach for depression detection using machine learning classifiers and social media texts. Computers in biology and medicine, 2021, vol. 135, 104499, DOI:10.1016/j.compbiomed.2021.104499.
- 31. Anadkat K. D., Diwanji H., Modasiya S. Effect of preprocessing in human emotion analysis using social media status dataset. RT&A, 2022, no. 1 (67), DOI:10.24412/1932-2321-2022-167-104-112.
- 32. Anadkat K. D., Diwanji H. Effect of activation function in speech emotion recognition on the ravdess dataset. RT&A, 2021, no. 3 (63), DOI:10.24412/1932-2321-2021-363-228-236.
- 33. Vázquez-Romero A., Gallardo-Antolín A. Automatic detection of depression in speech using ensemble convolutional neural networks. Entropy, 2020, no. 22, p. 688, DOI:10.3390/e22060688.
- 34. Вареца Е.С. Формирование личностной саморегуляции как личностного потенциала / Е.С. Вареца, О.В. Белоус, А.М. Дохоян // Новое в психолого-педагогических исследованиях, 2021. № 3-4(63). С. 147-154
- 35. Щербатых Ю.В. Психология стресса и методы коррекции / Ю.В. Щербатых. СПб.: Питер, 2018. 391 с.
- 36. Долгова В.И. Эмоциональная устойчивость как ключевая компетенция / В.И. Долгова, Г.Ю. Гольева. Челябинск: ATOKCO, 2010. 184 с.
- 37. Бурлачук Л.Ф. Словарь-справочник по психодиагностике / Л.Ф. Бурлачук, С.М. Морозов. Санкт-Петербург: Питер, 2000. 528 с.
- 38. Жеребцова Ю.А. Создание чат-бота: обзор архитектур и векторных представлений текста / Ю.А. Жеребцова, А.В. Чижик // International journal of open information technologies, 2020. №7. EDN: JYUFDU.
- 39. Михайлова А.Л. Нейросети в медиадизайне / А.Л. Михайлова, С.Ю. Щур. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2025. 184 с.
- 40. Искусственный интеллект и нейросети. Практика применения в современном мире / Е.Ю. Адамчукова, Ю.С. Белов, Т.М. Белоусова и др. Санкт-Петербург: НАЦРАЗВИТИЕ, 2025. 242 с. DOI 10.37539/M250224.2025.70.25.001.
- 41. Феоктистов А.В. О нейронной сети в учебном процессе системы профессионального образования // Искусственный интеллект и нейросети. Практика применения в современном мире. Санкт-Петербург: НАЦРАЗВИТИЕ, 2025. С. 177-180.
- 42. Носова Л.С. Искусственный интеллект и нейросети в образовательном пространстве вуза и школы / Л.С. Носова, Е.А. Леонова, В.А. Леонтьева, и др. Челябинск: Абрис, 2024. 196 с.
- 43. Вихман В.В. "Цифровые двойники" в образовании: перспективы и реальность / В.В. Вихман, М.В. Ромм // Высшее образование в России, 2021. Т. 30. № 2. С. 22-32. DOI 10.31992/0869-3617-2021-30-2-22-32.

**Борисенко Юлия Вячеславовна.** Доктор психологических наук, доцент, профессор кафедры акмеологии и психологи развития, Кемеровский государственный университет ( $\Phi\Gamma$ БОУ ВО Кем $\Gamma$ У). AuthorID: 495719, SPIN: 9876-8615, ORCID: 0000-0002-5218-2841, evseenkova@mail.ru. 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, 6.

**Борисенко Владислав Игоревич.** Студент ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО». eldamar17@mail.ru. 197101, Россия, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д.49, лит. А.

UDC 613.865:159.9.078

DOI:10.25729/ESI.2025.40.4.015

# The specifics of the neural network application and chatbot programming for mental health parameters diagnostics

Julia V. Borisenko<sup>1</sup>, Vladislav I. Borisenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kemerovo State University, Russia, Kemerovo, evseenkova@mail.ru

Abstract. The issues of mental and psychological health of adults, children and adolescents are becoming particularly relevant in the modern world. Urbanization, acceleration of the pace of life, digitalization of communication, mediatization of the educational environment and increasing demands on the volume of information processed by students of modern educational organizations can affect their emotional state, which can lead to various emotional disorders, the absence of which is one of the criteria for mental health. In the paper we present the results of the developing and programming of a chatbot for diagnosing the parameters of the respondent's mental health. The neural network was trained to recognize signs of depressive, anxious or aggressive tendencies of the respondent in the dialogue. In each case, neural network offers its own version of diagnostic instruments and recommendations for a respondent. We developed telegram chatbot to identify signs of depression, auto-aggression, or anxiety in the respondent's statements during communication. When identifying signs of risk, the chatbot offers a number of questions and, with informed consent, to take a psychological test. Several psychological tests were uploaded: the A. Beck Depression Scale; the A. Beck Anxiety Scale; the Auto— and Heteroaggression Questionnaire by E. P. Ilyin. The GigaChat neural network from the Sber company was used to communicate with the user. The programs were written in Python. This program can be used by educational organizations for monitoring the parameters of the emotional state of students.

Keywords: neural network, neural network training, chatbot, mental health, depression, anxiety, aggression

### References

- 1. Psihicheskoe zdorov'e (Vsemirnaja organizacija zdravoohranenija) [Mental health (World Health Organization)]. Available at: https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/mental-health-strengthening-our-response (accessed: 07/15/2025).
- 2. Comprehensive mental health action plan 2013–2030. Geneva: World Health Organization; 2021. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO, available at: https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/345301/9789240031029-eng.pdf?sequence=1 (accessed: 07/06/2025).
- 3. Ananyev V.A. Psikhologiya zdorov'ya [Psychology of Health]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2006, 384 p.
- 4. Lebedeva O.V. Problema sootnosheniya ponyatiy "psikhicheskoye zdorov'ye" i "psikhologicheskoye zdorov'ye" v otechestvennoy i zarubezhnoy psikhologo-pedagogicheskoy literature [The problem of the correlation between the concepts of "mental health" and "psychological health" in domestic and foreign psychological and pedagogical literature]. Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo [Bulletin of Lobachevsky University of Nizhny Novgorod], 2013, no. 3-1, pp. 33-37.
- 5. Erofeeva M.A., Zuykova A.A. Psikhicheskoye zdorov'ye kak psikhologicheskaya kategoriya: sushchnost' i granitsy ponyatiya [Mental health as a psychological category: essence and boundaries of the concept]. Formirovaniye zdorovogo obraza zhizni: uchebnoye posobiye [Formation of a healthy lifestyle: textbook]. Kolomna, Gosudarstvennyy sotsial'no-gumanitarnyy universitet [State Social and Humanitarian University] Publ., 2020, pp. 4-15.
- 6. Volgina T.L., Bakshutov S.N., Ovchinnikova N.R. Psikhicheskoye zdorov'ye studenta i kursanta osnova psikhicheskogo zdorov'ya natsii: opyt, perspektivy [Mental health of students and cadets as the foundation of the nation's mental health: experience and prospects]. Voprosy psikhicheskogo zdorov'ya detey i podrostkov [Questions of Mental Health of Children and Adolescents], 2017, vol. 17, no. S2, pp. 45-46.
- 7. Dzhamantaeva M.Sh., Raspopova N.I. Nekotorye aspekty psikhicheskogo zdorov'ya [Some aspects of mental health]. Vestnik KazNMU [Bulletin of KazNMU], 2016, no. 1. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/nekotorye-aspekty-psihicheskogo-zdorovya (accessed: 02.06.2025).
- 8. Deych R.V. Poliprofessional'nyy podkhod v terapii podrostkovykh depressiy: opyt kliniki krizisnoy pomoshchi [Multiprofessional approach in the therapy of adolescent depressions: the experience of a crisis care clinic]. Psikhicheskoye zdorov'ye [Mental Health], 2024, vol. 19, no. 5, pp. 62-64.
- 9. Belous O.V. Psikhologicheskoye zdorov'ye v aspekte ekologii lichnosti [Psychological health in the aspect of personality ecology]. Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Poznanie [Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice. Series: Cognition], 2020, no. 7, pp. 38-42, DOI:10.37882/2500-3682.2020.07.03.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> ITMO University, Russia, Saint-Petersburg

- 10. Alieva M.V., Tasueva M.R., Amirova E.F. Chat-boty v elektronnom obuchenii: novye vozmozhnosti i vyzovy [Chatbots in e-learning: new opportunities and challenges]. Zhurnal prikladnykh issledovaniy [Journal of Applied Research], 2023, no. 6, EDN: BFRCUK.
- 11. Kuzmina E.V., Salij V.V., Tretyakova N.V., et al. Tsifrovaya sreda: tekushcheye sostoyaniye i perspektivy [Digital environment: current state and prospects]. Krasnodar, Novatsiya Publ., 2024, 121 p.
- 12. Rezaev A.V., Tregubova N.D. Chatgpt i iskusstvennyy intellekt v universitetakh: kakoye budushcheye nam ozhidat'? [Chatgpt and artificial intelligence in universities: what future should we expect?]. Vyssheye obrazovaniye v Rossii [Higher Education in Russia], 2023, no. 6, pp. 19-37, DOI:10.31992/0869-3617-2023-32-6-19-37.
- 13. Glotova M.Yu., Samokhvalova E.A. Perspektivy vnedreniya chatbotov v obrazovaniye [Prospects for the implementation of chatbots in education]. Shkola budushchego [School of the Future], 2020, no. 4, pp. 72-87.
- 14. Mnatsakanyan V.V., Malofeev V.A., Chebotareva E.R. Razrabotka funktsional'nogo chat-bota kak sposob obucheniya programmirovaniyu shkol'nikov [Development of a functional chatbot as a way of teaching programming to schoolchildren]. Nauka. Upravleniye. Obrazovaniye. RF [Science. Management. Education. RF], 2023, no. 2(10), pp. 60-64.
- 15. Nartova-Bochaver S.K., Khodakovskaya E.N., Yurchuk V.Yu. Situatsionno-sobytiynyy podkhod k ponimaniyu psikhologicheskogo blagopoluchiya/neblagopoluchiya studencheskoy molodezhi [Situational and event-based approach to understanding the psychological well-being/maladjustment of student youth]. Sovremennaya zarubezhnaya psikhologiya [Modern Foreign Psychology], 2024, vol. 13, no. 4, pp. 41-50, DOI 10.17759/jmfp.2024130404.
- 16. Ermilov D.I. CHAT GPT: novaya tekhnologiya obshcheniya s klientami v bankovskoy sfere [CHAT GPT: a new technology for customer communication in the banking sector]. Finansovye rynki i banki [Financial Markets and Banks], 2023, no. 7, pp. 18-22, EDN:IWGGEZ.
- 17. Pashkin S.B., Turchin A.S., Sarkisova E.A. Sistema meropriyatiy psikhologicheskoy pomoshchi voennosluzhashchim v interesakh ukrepleniya, sokhraneniya, vosstanovleniya psikhicheskogo zdorov'ya [A system of psychological assistance measures for military personnel aimed at strengthening, preserving, and restoring mental health]. Vestnik Sankt-Peterburgskogo voennogo instituta voysk natsional'noy gvardii [Bulletin of the St. Petersburg Military Institute of the National Guard Troops], 2020, no. 1 (10), pp. 82-88.
- 18. Nazmetdinova D.G., Obukhovskaya V.B. Osobennosti kognitivnoy i emotsional'no-volevoy sfer patsiyentov s postinsul'ntymi nevrologicheskimi narusheniyami na raznykh etapakh vosstanovitel'nogo lecheniya [Features of the cognitive and emotional-volitional sphere of patients with post-stroke neurological disorders at different stages of rehabilitation treatment]. Psikholog [Psychologist], 2020, no. 1, pp. 9-15, DOI:10.25136/2409-8701.2020.1.31680.
- 19. Nikitina E.A. Faktory psikhologicheskogo blagopoluchiya zhenshchin raznogo vozrasta [Factors of psychological well-being of women of different ages]. Onto- i sub"ektogenez psikhicheskogo razvitiya cheloveka [Onto- and subjectogenesis of human mental development]. Moscow, Institut psikhologii RAN [Institute of Psychology RAS] Publ., 2022, pp. 209-219.
- 20. Branitsky A.A., Sharma Y.D., Kotenko I.V., Fedorchenko E.V., Krasov A.V., Ushakov I.A. Opredeleniye psikhicheskogo sostoyaniya pol'zovateley sotsial'noy seti REDDIT na osnove metodov mashinnogo obucheniya [Determining the mental state of REDDIT social network users based on machine learning methods]. Informatsionno-upravlyayushchiye sistemy [Information and Control Systems], 2022, no. 1 (116), DOI:10.31799/1684-8853-2022-1-8-18.
- 21. Volnikov M.S., Danilov E.A. Obzor sushchestvuyushchikh resheniy chat-botov, ispol'zuyushchikh iskusstvennyye neyronnyye seti: ikh vozmozhnosti, preimushchestva i nedostatki [Review of existing chatbot solutions using artificial neural networks: their capabilities, advantages and disadvantages]. Sovremennyye informatsionnyye tekhnologii [Modern Information Technologies], 2024, no. 39(39), pp. 9-15.
- 22. Kiselnikova N.V., Stankevich M.A., Danina M.M., et al. Vyyavleniye informativnykh parametrov povedeniya pol'zovateley sotsial'noy seti vkontakte kak priznakov depressii [Detection of informative parameters of VKontakte social network user behavior as signs of depression]. Psikhologiya. Zhurnal VShE [Psychology. HSE Journal], 2020, no. 1, DOI:10.17323/1813-8918-2020-1-73-88.
- 23. Kopytova A.V. Lingvopragmaticheskiye osobennosti situatsii obshcheniya "chelovek chat-bot" [Linguopragmatic features of the "human-chatbot" communication situation]. Chelovek: Obraz i sushchnost'. Gumanitarnyye aspekty [Human: Image and Essence. Humanitarian Aspects], 2023, no. 2 (54), DOI:10.31249/chel/2023.02.07.
- 24. Beck A.T., Ward C.H., Mendelson M., et al. An inventory for measuring depression. Archives of general psychiatry, 1961, no. 4(6), pp.561–571, DOI:10.1001/archpsyc.1961.01710120031004.
- 25. Odintsova M.A., Zakharova N.L. Psikhologiya stressa: uchebnik i praktikum dlya vuzov [Psychology of Stress: Textbook and Workshop for Universities]. Moscow, Yurait Publ., 2025, 291 p., available at: https://urait.ru/bcode/561139 (accessed: 02/25/2025).

- 26. Beck A.T., Epstein N., Brown G., et al. An inventory for measuring clinical anxiety: Psychometric properties. Journal of consulting and clinical psychology, 1988, no. 56(6), pp. 893-897, DOI:10.1037/0022-006X.56.6.893
- 27. Ilyin E.P. Psikhologiya individual'nykh razlichiy [Psychology of Individual Differences]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2004, 701 p.
- 28. Vandana, Marriwala N., Chaudhary D.A hybrid model for depression detection using deep learning. Measurement: Sensors, 2023, vol. 25, p. 100587, DOI:10.1016/j.measen.2022.100587.
- 29. Ridlan A., Hasanudin M., Da Costa Tavares O.C., et al. Early autism disorder prediction using machine learning. International journal of open information technologies, 2025, no. 1, DOI:10.3390/diagnostics15151859
- 30. Chiong R., Budhi G. S., Dhakal, S., et al. A textual-based featuring approach for depression detection using machine learning classifiers and social media texts. Computers in biology and medicine, 2021, vol. 135, 104499, DOI:10.1016/j.compbiomed.2021.104499.
- 31. Anadkat K. D., Diwanji H., Modasiya S. Effect of preprocessing in human emotion analysis using social media status dataset. RT&A, 2022, no. 1 (67), DOI:10.24412/1932-2321-2022-167-104-112
- 32. Anadkat K. D., Diwanji H. Effect of activation function in speech emotion recognition on the ravdess dataset. RT&A, 2021, no. 3 (63), DOI:10.24412/1932-2321-2021-363-228-236
- 33. Vázquez-Romero A., Gallardo-Antolín A. Automatic detection of depression in speech using ensemble convolutional neural networks. Entropy, 2020, no. 22, p. 688, DOI:10.3390/e22060688.
- 34. 34. Varetsa E.S., Belous O.V., Dokhoyan A.M. Formirovaniye lichnostnoy samoregulyatsii kak lichnostnogo potentsiala [Formation of personal self-regulation as a personal potential]. Novoye v psikhologopedagogicheskikh issledovaniyakh [New in Psychological and Pedagogical Research], 2021, no. 3-4(63), pp. 147-154.
- 35. Shcherbatykh Y.V. Psikhologiya stressa i metody korrektsii [Psychology of stress and correction methods]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2018, 391 p.
- 36. Dolgova V.I., Gol'eva G.Yu. Emotsional'naya ustoychivost' kak klyuchevaya kompetentsiya [Emotional stability as a key competence]. Chelyabinsk, ATOKSO Publ., 2010, 184 p.
- 37. Burlachuk L.F., Morozov S.M. Slovar'-spravochnik po psikhodiagnostike [Dictionary-reference book on psychodiagnostics]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2000, 528 p.
- 38. Zherebtsova Yu.A., Chizhik A.V. Sozdanie chat-bota: obzor arkhitektur i vektornykh predstavleniy teksta [Creating a chatbot: an overview of architectures and text vector representations]. International Journal of Open Information Technologies, 2020, no. 7, EDN: JYUFDU.
- 39. Mikhaylova A.L., Shchur S.Yu. Neyseti v mediadizayne [Neural networks in media design]. Saint Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University Publ., 2025, 184 p.
- 40. Adamchukova E.Yu., Belov Yu.S., Belousova T.M. et al. Iskusstvennyy intellekt i neyroseti. Praktika primeneniya v sovremennom mire [Artificial intelligence and neural networks. Practice of application in the modern world]. Saint Petersburg, NATsRAZVITIYE Publ., 2025, 242 p., DOI:10.37539/M250224.2025.70.25.001.
- 41. Feoktistov A.V. O neyronnoy seti v uchebnom protsesse sistemy professional'nogo obrazovaniya [On the neural network in the educational process of the vocational education system]. Iskusstvennyy intellekt i neyroseti. Praktika primeneniya v sovremennom mire [Artificial intelligence and neural networks. Practice of application in the modern world]. Saint Petersburg, NATsRAZVITIYE Publ., 2025, pp. 177-180.
- 42. Nosova L.S., Leonova E.A., Leont'eva V.A., Belyakov A.V. Iskusstvennyy intellekt i neyroseti v obrazovatel'nom prostranstve vuza i shkoly [Artificial intelligence and neural networks in the educational space of universities and schools]. Chelyabinsk, Abris Publ., 2024, 196 p.
- 43. Vikhman V.V., Romm M.V. "Tsifrovyye dvoiniki" v obrazovanii: perspektivy i real'nost' ["Digital twins" in education: prospects and reality]. Vyssheye obrazovaniye v Rossii [Higher Education in Russia], 2021, vol. 30, no. 2, pp. 22-32, DOI 10.31992/0869-3617-2021-30-2-22-32.

Borisenko Julia Vyacheslavovna. Ph.D., Doctor of Psychology, Professor, Department of Acmeology and Developmental Psychology. AuthorID: 495719, SPIN: 9876-8615, ORCID: 0000-0002-5218-2841, evseenkova@mail.ru. Kemerovo State University (KemSU). AuthorID: 495719, SPIN: 9876-8615, ORCID: 0000-0002-5218-2841, evseenkova@mail.ru. 650000, Russia, Kemerovo, Krasnaya str., 6.

**Borisenko Vladislav Igorevich.** Student of ITMO University. eldamar17@mail.ru. 197101, Russia, St. Petersburg, Kronverksky Pr. 49, bldg. A.

Статья поступила в редакцию 01.05.2025; одобрена после рецензирования 15.07.2025; принята к публикации 03.10.2025.

The article was submitted 05/01/2025; approved after reviewing 07/15/2025; accepted for publication 10/03/2025.

## Памяти Берестневой Ольги Григорьевны



30.10.1953 - 05.10.2025

Ушла из жизни Ольга Григорьевна Берестнева — наш друг и коллега, член редколлегии нашего журнала, член программного комитета нашей конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении».

Ольга Григорьевна Томский окончила политехнический институт специальности ПО «Прикладная математика» в 1976 году, с этого времени по июнь 2025 года работала в Томском политехническом университете, в должностях инженера, ассистента, старшего преподавателя, доцента, профессора. В 1989 г. защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.11, а в 2007 г. – докторскую диссертацию по специальности 05.13.01. Область научных интересов – математическое моделирование и информационные технологии в социальной сфере и медицине.

В 1999 — 2012 гг. руководила лабораторией компьютерной психодиагностики ТПУ, в 2012 — 2016 гг. — научно-учебной лабораторией информационных технологий в социальных и медицинских исследованиях Института кибернетики ТПУ. Коллектив лаборатории неоднократно награждался дипломами конкурса «НИР Томского политехнического университета» (2007, 2010, 2011, 2013 гг.) в номинации «Социально-экономические и гуманитарные работы».

Ольга Григорьевна — руководитель более 100 проектов Российских научных фондов, а также проекта «Математическое и программное обеспечение системы поддержки научных исследований в социальной сфере, образовании и медицине» по Госзаданию «Наука». Ею опубликованы более 300 работ, в том числе 12 монографий и 8 учебных пособий. В этом номере журнала публикуется ее последняя статья.

Ольга Григорьевна включена в перечень «Топ-100» самых цитируемых российских учёных по данным ресурса elibrary.ru. Зарегистрирована в федеральном реестре экспертов научно-технической сферы ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, была экспертом РФФИ и РНФ, а также членом Диссертационного Совета Д 212.268.05 (специальность 05.13.10 - Управление в социальных и экономических системах). Активно вела научно-педагогическую работу, вокруг нее всегда было много студентов и аспирантов. Выполненные под ее руководством НИР неоднократно занимали первые места на Всероссийских конкурсах студенческих работ.

Под формальным руководством Ольги Григорьевны защищены 3 кандидатские диссертации, под неформальным — гораздо больше. Ее ученики — нынешние кандидаты и доктора наук — работают в университетах и научных организациях по всей стране. За годы работы она была награждена множеством дипломов, грамот и благодарственных писем всероссийского и регионального уровней, а также почетной грамотой Минобразования РФ и медалью «За развитие Томского политехнического университета». Являлась победителем конкурса ТПУ «Ученый года» и занесена в галерею почета Томского политехнического университета.

Ольга Григорьевна была не только высококвалифицированным специалистом, но и замечательным человеком, который оставил значимый след в сердцах друзей, коллег и студентов. Её трудолюбие, профессионализм и доброта навсегда останутся в нашей памяти. Мы выражаем искренние соболезнования всем, кто знал и любил Ольгу Григорьевну. Пусть светлая память о ней живет в наших сердцах!

