

Московский Государственный Университет  
имени М.В. Ломоносова  
Российская Академия Наук  
Международная Академия Технологических Наук  
Российская Академия Естественных Наук

# **Интеллектуальные Системы.**

## **Теория и приложения**

**ТОМ 26 ВЫПУСК 1 \* 2022**

**МОСКВА**

**Главный редактор:** д.ф.-м.н., профессор Э.Э. Гасанов

**Редакционная коллегия:**

д.ф.-м.н., проф. А. Е. Андреев	(зам. главного редактора)
к.ф.-м.н., с.н.с. А.В. Галащенко	(зам. главного редактора)
к.ф.-м.н., доц. А. С. Строгалов	(зам. главного редактора)
к.ф.-м.н., м.н.с. В. В. Осокин	(ответственный секретарь)

д.ф.-м.н., проф. В.В.Александров, д.ф.-м.н., проф. С.В.Алешин, д.ф.-м.н., проф. Д.Н.Бабин, проф. К.Вашик, проф. Я.Деметрович, академик РАН, д.ф.-м.н., проф. Ю.Л.Ершов, проф. Г.Килибарда, д.ф.-м.н., проф. В.Н.Козлов, д.ф.-м.н., проф. А.В.Михалев, к.ф.-м.н, в.н.с. В.А.Носов, д.ф.-м.н., проф. А.С.Подколзин, д.ф.-м.н., проф. Ю.П.Пытьев, д.т.н, проф. А.П.Рыжов, академик РАН, д.т.н, проф. А.С.Сигов, проф. Б.Тальхайм, проф. Ш.Ушчумлич, д.ф.-м.н, доц. А.А.Часовских, д.ф.-м.н, проф. А.В.Чечкин, к.ф.-м.н. Р.Шчепанович.

**Секретарь редакции:** И. О. Бергер, Е. В. Кузнецова

В журнале «Интеллектуальные системы. Теория и приложения» публикуются научные достижения в области теории и приложений интеллектуальных систем, новых информационных технологий и компьютерных наук.

Издание журнала осуществляется под эгидой МГУ имени М. В. Ломоносова, Научного Совета по комплексной проблеме «Кибернетика» РАН, Отделения «Математическое моделирование технологических процессов» МАТН, Секции «Информатики и кибернетики» РАЕН.

Учредитель журнала: ООО «Интеллектуальные системы».

Журнал входит в список изданий, включенных ВАК РФ в реестр публикаций материалов по кандидатским и докторским диссертациям по математике и механике.

Спонсором издания является:

**ООО «Два Облака»**

Разработка корпоративных информационных систем  
<http://www.dvaoblaka.ru>

Индекс подписки на журнал: 64559 в каталоге НТИ «Роспечать».

Адрес редакции: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, д. 1, механико-математический факультет, комн. 12-01.

Адрес издателя: 115230, Россия, Москва, Хлебозаводский проезд, д. 7, стр. 9, офис 9. Тел. +7 (495) 939-46-37, e-mail: [mail@intsysjournal.org](mailto:mail@intsysjournal.org)

\*) Прежнее название журнала: «Интеллектуальные системы».

© ООО «Интеллектуальные системы», 2022.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Памяти Валерия Борисовича Кудрявцева ..... 10

### Часть 1. Пленарные доклады

*Wansing H.* A case-study in logical tetralateralism ..... 13

*Армеев Г.А., Кирпичников М.П., Кобельков Г.М., Кудрявцев А.В., Ложников М.А., Новоселецкий В.Н., Шайтан А.К., Шайтан К.В.* Применение нейронных сетей для распознавания конформационных изменений в структуре белка по рентгеновским дифрактограммам его одиночных молекул на примере фотосинтеза бактериородопсина ..... 24

*Дивеев А.И.* Машинное обучение систем интеллектуального управления .. 35

*Лугачев М.И., Гимранов Р.Д., Скрипкин К.Г.* Сервисы искусственного интеллекта в современной экономике ..... 44

*Лукашевич Н.В.* Автоматический анализ тональности текстов: проблемы и методы ..... 50

*Шокуров А.В.* Машинное зрение: от задачи до аппаратной реализации .... 62

*Шумский С.А.* Новые архитектуры сильного ИИ, основанные на принципах работы мозга ..... 82

### Часть 2. Математика и компьютерные науки

*Бабин Д.Н.* К вопросу о функциональной системе автоматов с операцией суперпозиции ..... 91

*Гасанов Э.Э., Суюнбекова М.Б.* О новом алгоритме достижения консенсуса для стабильных криптовалют ..... 94

*Мионов А.М.* Процессный подход к моделированию и верификации параллельных программ ..... 101

*Наумов И.Е., Хворостухина Е.В.* Построение  $r$ -гиперграфов методом имитации отжига ..... 107

<i>Рыжов А.П., Синько А.К.</i> О качественном сравнении семейств вещественных функций .....	112
<i>Тензина В.В.</i> Применение топологически простых колец в криптографии	116
<i>Чубариков В.Н.</i> Информатика, компьютер, сложность вычислений .....	121
<i>Шалагин С.В., Нуритдинова А.Р.</i> Реализация модифицированного метода Рабинера для множества стохастических матриц на нейронных сумматорах .	129

### **Часть 3. Интеллектуальный анализ больших данных**

<i>Айдагулов Р.Р.</i> Алгоритмы быстрого умножения .....	134
<i>Айдагулов Р.Р.</i> Бигрупповые алгебры и теорема Поттера .....	140
<i>Главацкий С.Т., Бурькин И.Г.</i> Преподавание фундаментальных основ искусственного интеллекта как реализация концепции нового научного знания .	146
<i>Голозубов О.М., Чернова О.В.</i> Динамическое формирование и обновление карты запасов органического углерода на территории России как задача интеллектуального анализа Больших данных .....	153
<i>Горный Б.Э., Рыжов А.П., Строгалов А.С., Хусаинов А.А., Шергин И.А., Феценко Д.А., Абдуллаев А. М., Концевая А. В.</i> Построение классификаторов в задаче прогнозирования риска неблагоприятного клинического исхода на основе клинико-демографических показателей пациента .....	160
<i>Рыжов А.П., Горный Б.Э., Зудин А.В.</i> Измерение алкогольного благополучия регионов на основе статистической информации .....	164
<i>Тарлинский И.В.</i> Построение поисковой системы, учитывающей контекстное вхождение общих между запросом и документами слов .....	170

### **Часть 4. Обработка естественного языка**

<i>Бескова И.А.</i> Интенциональная семантика в анализе естественного языка	174
<i>Богомолова А.</i> Сетевой кластерный подход к анализу естественного языка и его применение .....	179
<i>Большина А. С.</i> Создание псевдоаннотированного обучающего корпуса для	

задачи разрешения лексической неоднозначности с помощью ансамбля моделей ..... 185

*Калабихина И.Е., Лукашевич Н.В., Банин Е.П., Алибаева К.В.* Автоматический анализ репродуктивных ценностей пользователей сети ВКонтакте 190

*Лютикова Е.А., Герасимова А.А., Белова Д.Д., Студеникина К.А., Лютиков А.С.* Три аспекта непротиворечивости языковых данных: оценка и интерпретация ..... 196

*Менькин М.И.* Семантический анализ некоторых типов предложений Правил дорожного движения ..... 203

## **Часть 5. Искусственные нейронные сети и машинный интеллект**

*Бабич Н.А.* Решение задачи классификации с помощью интерференционной модели нейронной сети ..... 209

*Бережной Д.С., Бергалиев Т.К.* Искусственный интеллект как инструмент для решения практических задач в нейробиологических исследованиях ... 214

*Иванов Д.А.* Аппаратное обеспечение для нейросетей ..... 220

*Кацер Ю.Д., Козицин В.О.* Диагностика нефтяных трубопроводов с помощью машинного обучения ..... 225

*Ковалев Ю.С., Бережной Д.С., Сагно С.В., Бергалиев Т.К., Киселева М.А.* Интегральная система для обработки биосигналов на основе алгоритмов ИИ и перспективы ее применения ..... 229

*Козицин В.О., Кацер Ю.Д.* Фреймворк с открытым исходным кодом для обнаружения аномалий и прогнозирования состояния в технических системах 236

*Кузьмин В.Ю.* Совместное применение рекуррентных нейронных сетей и статистических методов для увеличения точности прогнозирования океанологических данных ..... 241

*Проничкин Ю.В., Кумсков М.И.* Оценка позы человека как задача классификации ..... 246

*Сучков Е.П., Алексеенко Г.О., Налчаджян К.В.* Использование сверточных нейронных сетей для реидентификации людей в городских условиях ..... 250

*Хвостиков А.В., Крылов А.С., Коршунов Д.М., Богуславский М.А.* Автоматическая идентификация минералов на изображениях аншлифов с использованием глубокого обучения ..... 255

## **Часть 6. Интеллектуальное управление, роботы и биомехатронные системы**

*Бугрий Г.С.* Применение рекуррентной нейронной сетм для идентификации динамики стенда типа центрифуги ..... 262

*Замитов Э.И., Долгий А.С., Шокуров А.В.* Планирование движения автономного робота в лабиринте с препятствиями ..... 267

*Миняйло Я.Ю., Комаровский А. Ю., Крымшамхалов А. Х.* Программное обеспечение для регистрации движения глаз ..... 273

*Сухочев П. Ю., Миняйло Я. Ю.* Применение окулографии для объективной оценки воспроизведения акселерационных эффектов тренажёрными устройствами имитации полета ..... 276

*Черданцева В.В., Бугрий Г.С., Леонов С.В., Поликанова И.С., Якушина А.А., Чертополохов В.А.* Адаптация технологии отслеживания движений человека для создания аватара внутри интерактивной виртуальной среды ..... 282

## **Часть 7. Нейроморфный искусственный интеллект и когнитивные системы**

*Алипов В.И., Торопова К.А., Ивашкина О.И., Анохин К.В.* Исследование кратковременной и долговременной памяти в задаче распознавания положения объектов у мышей ..... 288

*Диффинэ Е.А., Смирнова А.А.* Исследование когнитивных способностей серых ворон при помощи комплекса задач на базе Эзопова теста ..... 294

*Заморина Т.А., Торопова К.А., Ивашкина О.И., Анохин К.В.* Исследование механизмов формирования пожизненной памяти в когнитивных системах на модели посттравматического стрессового расстройства у мышей ..... 300

*Казанская Л.С., Ивашкина О.И., Торопова К.А., Анохин К.В.* Сопоставление паттернов экспрессии генов *c-fos* и *arc* в головном мозге мышей при формировании и извлечении обстановочной ассоциативной памяти ..... 306

*Киселев М.В.* Алгоритм SCoBUL обучения без учителя импульсной нейронной

сети и его применение для выделения информативных признаков из сигнала DVS камер ..... 311

*Кубенко К.Н., Смирнова А.А.* Исследование когнитивных способностей серых ворон при помощи нового типа протоорудийных задач ..... 316

*Лазуткин А.А., Шуваев С.А.* DOGHOUSE: новый метод исследования пространственно-временной динамики активности мозга ..... 321

*Ларионов Д.А. Иванов Д.А. Киселев М.В.* Нейроморфные системы искусственного интеллекта ..... 327

*Плюснин В.В., Торопова К. А., Ивашкина О.И., Анохин К.В.* Кодирование пространства и объектов в гиппокампе: роль новизны и значимости объектов в формировании когнитивной специализации нейронов ..... 332

*Поспелов Н.А., Сотсков В.П., Анохин К.В., Нечаев С.К., Горский А.С.* Извлечение коллективных переменных из многомерной нейронной активности клеток места ..... 337

*Рогожникова О.С. , Ивашкина О.И., Торопова К.А., Солотёнков М.А., Федотов И.В., Желтиков А.М., Анохин К.В.* Исследование кальциевой активности нейронов ретроспленальной коры при обследовании нового пространства и объектов у мышей ..... 341

*Теплюк А.В.* Нейроморфные системы машинного зрения ..... 346

*Торопова К.А., Ивашкина О.И., Иванова А.А., Коновалова Е.В., Анохин К.В.* Эффекты травматического опыта на поведение, экспрессию c-fos и функциональные связи в сети состояния покоя мозга мыши ..... 351

*Федянин Д.* Об одном способе моделирования когнитивно-ограниченных выводов формул ..... 354

## **Часть 8. Человеко-ориентированный искусственный интеллект и нейроинтерфейсные технологии**

*Thalheim В.* Artificial Intelligence Enhanced By Modelling ..... 360

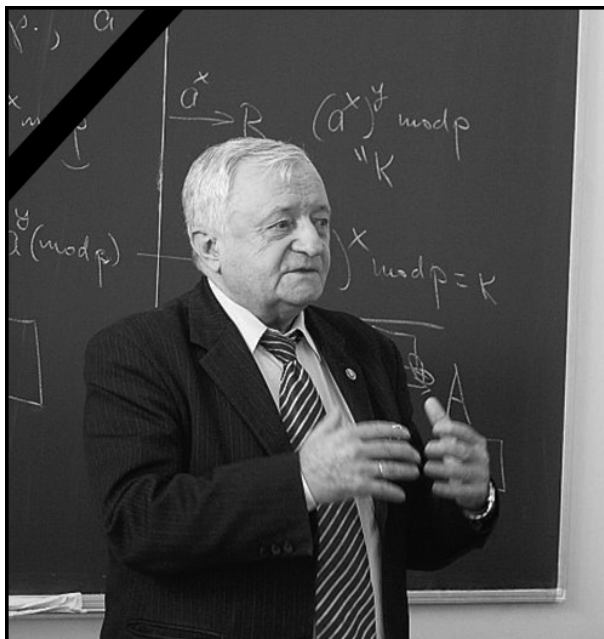
*Брызгалкина Е.В.* Философский анализ ограничений использования систем искусственного интеллекта в образовании ..... 367

*Винокуров Ф.Н., Панов К.А.* Великий уравниватель. Может ли голосовой по-

мощник модерировать групповое взаимодействие? .....	371
<i>Клюева Н.Ю.</i> Этическое регулирование технологий искусственного интеллекта .....	377
<i>Онучин А.А.</i> Перспективы и ограничения нейросетевых моделей в нейронауках .....	380
<i>Рыжов А.П.</i> Проблемы разработки систем Гибридного Интеллекта .....	385
<i>Садовская Е.Д., Винокуров Ф.Н.</i> Какими нас делает Искусственный Интеллект: беззаботными или безработными? .....	390
<i>Углонова И. Л., Гельвер Е. С., Тарасов С. В., Грачева Д. А.</i> Диагностика креативности: нейронные сети для анализа графических решений в компьютерном тестировании .....	396
<i>Углонова И.Л., Тарасов С.В., Чурбанова С.М., Орел Е.А.</i> Заменим ли «ручной труд»: измерение креативности в цифровой среде без привлечения экспертов	400
<b>Часть 9. Представление знаний и автоматизация рассуждений</b>	
<i>Grigoriev O. M., Petrukhin Y. I.</i> Towards Relevant Multilattice Logic .....	407
<i>Kubyshkina E., Petrolo M.</i> Epistemic logics for ignorance representation .....	411
<i>Долгоруков В.В.</i> Кришке+ДеГроот: эпистемико-доксатическая модель социального влияния .....	413
<i>Кокорев Р.А., Лаврентьева О.Н., Суржова И.Б., Толстель М.С., Трушина В.С.</i> Искусственный интеллект в финансах: за или против человека .....	417
<i>Маркин В.И.</i> Логика суждений существования как средство представления знаний и автоматической проверки умозаключений .....	422
<i>Морозов А.А., Тищенко Е.Б.</i> Искусственный интеллект как инструмент построения персональных инвестиционных маршрутов для технологических проектов .....	427
<i>Моросанова А.А.</i> Экономический анализ поведения участников цифровых экосистем .....	432



*Шалак В.И.* Минимальная логика для анализа технологий ..... 438



4 июля 1936 г. – 23 декабря 2021 г.

## Памяти Валерия Борисовича Кудрявцева

Редакционный совет журнала «Интеллектуальные системы. Теория и приложения» с глубоким прискорбием извещает, что 23 декабря на 86 году жизни скончался выдающийся деятель науки и культуры России, заслуженный профессор Московского университета, заведующий кафедрой математической теории интеллектуальных систем, бессменный главный редактор нашего журнала, доктор физико-математических наук, профессор **Валерий Борисович Кудрявцев**.

Кудрявцев В.Б. родился в городе Егорьевске Московской области в семье военнослужащего. После окончания в 1955 г. средней школы с золотой медалью он поступил на механико-математический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова, с которым оказалась связанной вся его научная и педагогическая деятельность: на факультете он прошел весь путь от студента и аспиранта до профессора и заведующего кафедрой.

В 1964 г. В. Б. Кудрявцев защитил кандидатскую диссертацию, в 1972 г. защитил докторскую диссертацию по теории функциональных систем. С 1974 г. В. Б. Кудрявцев работал заместителем декана механико-математического факультета сначала по международным связям, а затем заместителем декана по научно-исследовательской части и прорабо-

тал на этом посту до 1986 г., внося значимый вклад в развитие факультета и превращение его в ведущий центр фундаментальных и прикладных исследований.

С 1986 г. В. Б. Кудрявцев заведует вновь созданной на факультете лабораторией теоретической кибернетики, которая входила в созданный ректором МГУ В.А. Садовничим «Отдел прикладных исследований по математике и механике».

В 1991 году В.Б. Кудрявцев выступил с инициативой создания новой кафедры – математической теории интеллектуальных систем – и стал ее первым заведующим.

За прошедшие годы кафедра превратилась в крупнейший учебно-научный центр России, в котором под руководством В.Б. Кудрявцева широким фронтом велись фундаментальные и прикладные работы по современным направлениям науки.

С 2006 г. по 2018 г. В. Б. Кудрявцев руководил филиалом Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова в Ташкенте, который под его руководством достиг больших успехов в подготовке кадров высшей квалификации для Республики Узбекистан.

Научные интересы В. Б. Кудрявцева охватывали различные области дискретной математики, математической кибернетики и информатики. Ему принадлежат фундаментальные результаты в теории автоматов, дискретных функций, распознавания образов, интеллектуальных систем и др. Полученные В.Б. Кудрявцевым результаты опубликованы более чем в 230 статьях, 17 книгах, в 35 патентах США по микроэлектронике. В. Б. Кудрявцевым создана большая научная школа, включающая 27 докторов и 88 кандидатов наук по математике и её приложениям.

В 1996 г. В. Б. Кудрявцев основал журнал «Интеллектуальные системы» и был бессменным главным редактором этого издания, являясь одновременно заместителем главного редактора журнала «Дискретная математика». Многие годы В. Б. Кудрявцев входил в состав советов по защите докторских диссертаций и ВАК, являлся членом ученого совета механико-математического факультета и ученого совета МГУ.

Достижения В. Б. Кудрявцева были отмечены избранием его академиком МАН, РАЕН и МАИ, ему присвоены звания «Заслуженный деятель науки РФ» и «Заслуженный профессор МГУ», он был избран почётным доктором Белградского университета.

Редакционная коллегия нашего журнала, вся научная общественность выражают соболезнования родным и близким покойного. Память о замечательном человеке, ученом и гражданине сохранится в наших сердцах.

**Часть 1.**  
**Пленарные доклады**

# A case study in proof-theoretic tetralateralism

H. Wansing<sup>1</sup>

We present an expansion of the paraconsistent logic **N4** by operators for meaningfulness and nonsensicality. This logic contains three congruentiality-breaking unary connectives, which gives rise to a tetra-lateral sequent calculus with four different sequent arrows.

*Keywords:* inconsistency-tolerant logic, sequent calculus, proof-theoretic multilateralism.

Joint work with Sara Ayhan

## Introduction

In recent years knowledge representation formalisms based on various non-classical logics instead of classical logic have attracted increasing attention. In description logic, for example, various approaches to modeling paraconsistent, inconsistency-tolerant reasoning have been developed. In the paper [4, p. 301] from 2003 it was remarked that

[t]here is some work on description logics using non-monotonic, many-valued, or fuzzy-logic, see [4, Chapter 6], however, the underlying logic of almost all systems of description logic is *classical*.

Here [4] is *The Description Logic Handbook*, edited by F. Baader et al., Cambridge University Press, 2003. When the second part of [4] appeared in 2008 [5], the situation had already changed considerably. In 2005, e.g., the edited volume [2] on inconsistency tolerance was published, observing “a need to develop tolerance to inconsistency in application technologies such as databases, knowledgebases, and software systems,” and nowadays inconsistency handling in description logic based ontologies is an established area within knowledge representation.

A prominent example of a paraconsistent logic that has found quite a few applications in knowledge representation and AI is first-degree entailment logic, **FDE**, for a survey see [6]. The system FED lacks a genuine implication, however, and the paraconsistent logic **N4** due to A. Almukdad and D. Nelson [1] expands **FDE** by a constructive conditional. There is a sequent calculus

---

<sup>1</sup>*Heinrich Wansing* — Professor of Logic and Epistemology, Ruhr University Bochum, Germany, Department of Philosophy I.

for **N4** that makes use of two sequent arrows standing for different derivability relations, one that represents the preservation of support of truth, whereas the other represents the preservation of support of falsity, cf. [3]. The present paper is about an expansion of **N4** by operators for meaningfulness and nonsensicality. This logic contains three congruentiality-breaking unary connectives, which gives rise to a tetralateral sequent calculus with four different sequent arrows.

## 1. What is proof-theoretic bi- and tetralateralism?

Proof-theoretic tetralateralism is a generalization of proof-theoretic bilateralism. The full paper [10] contains a comparison of various approaches to proof-theoretic bilateralism and proposes a definition of proof-theoretic multi-lateralism. For reasons of space, in this abstract, we briefly mention only one understanding of proof-theoretic bilateralism and highlight some differences with the present approach to proof-theoretic tetralateralism.

According to D. Ripley, [7], bilateralism “is the view that which inferences are valid is . . . to be explained in terms of conditions on *assertion* and *denial*.” In [8] he explains that “*bilateralism*, holds that we must consider conditions governing the speech acts of assertion and denial. For a bilateralism to genuinely be *bi*, then, it must hold that denial conditions cannot themselves be understood as deriving only from assertion conditions,” and in [9], Ripley characterizes bilateralism as “the view that meanings in general are to be given via conditions on assertion and denial.”

Most definitions of bilateralism have in common a reference to the speech acts of assertion and denial, or attitudes of acceptance and rejection, and emphasize that those two notions are on a par and equally important. Another point often mentioned is that in bilateralism rejection or denial are seen as conceptually prior to negation, i.e., the denial of  $A$  is not interpreted in terms of, or as the assertion of the negation of  $A$  but the other way around

The notion of bilateralism advocated in [10] does not consider speech acts or propositional attitudes as the primary notions to act upon in the context of a proof-theoretic theory of meaning (or semantics in general). Rather proof-refutation, provability-refutability, verification-falsification, demonstrability of meaningfulness-demonstrability of nonsensicality are central pairs of proof-theoretically relevant semantical concepts. This is reflected in the presence of two or more separate derivability relations.

## 2. A case-study in proof-theoretic tetralateralism

We will expand the language of propositional **N4** by two unary connectives,  $[m]$  and  $[n]$ . A formula  $[m]A$  is to be read as “it is meaningful that  $A$ ”, and  $[n]A$  is to be understood as “it is nonsensical that  $A$ ”. The logic of the expanded language will be referred to as **N4mn**.

## 3. Kripke semantics and completeness

The propositional language  $\mathcal{L}$  of **N4mn** is defined in Backus-Naur form as follows:

$$\begin{aligned} \text{variables } \Phi: & p \in \Phi \\ \text{formulas: } & A \in \text{Form}_{\mathcal{L}}(\Phi) \\ A ::= & p \mid (A \wedge A) \mid (A \vee A) \mid (A \rightarrow A) \mid \sim A \mid [m]A \mid [n]A. \end{aligned}$$

We use  $A \leftrightarrow B$  as an abbreviation of  $(A \rightarrow B) \wedge (B \rightarrow A)$ . The language  $\mathcal{L}'$  of positive intuitionistic propositional logic, **IPL**<sup>+</sup>, is obtained from  $\mathcal{L}$  by dropping the unary connectives, i.e.,  $\sim$ ,  $[m]$ , and  $[n]$ , and the language  $\mathcal{L}''$  of the propositional logic **N4** is obtained from  $\mathcal{L}$  by dropping  $[m]$  and  $[n]$ .

**Definition 1.** A Kripke frame is a structure  $\langle M, R \rangle$ , where  $M$  is a nonempty set (of information states), and  $R$  is a reflexive and transitive binary relation (of information state expansion) on  $M$ .

**Definition 2.** A valuation  $\models$  on a Kripke frame  $\langle M, R \rangle$  is a mapping from the set  $\Phi$  of propositional variables to the power set  $2^M$  of  $M$  such that for any  $p \in \Phi$  and any  $x, y \in M$ , if  $x \in \models (p)$  and  $xRy$ , then  $y \in \models (p)$ . We will write  $x \models p$  for  $x \in \models (p)$ . This valuation  $\models$  is extended to a mapping from the set of all  $\mathcal{L}'$ -formulas to  $2^M$  by:

$$\begin{aligned} x \models A \rightarrow B & \text{ iff } \forall y \in M [xRy \text{ and } y \models A \text{ imply } y \models B], \\ x \models A \wedge B & \text{ iff } x \models A \text{ and } x \models B, \\ x \models A \vee B & \text{ iff } x \models A \text{ or } x \models B. \end{aligned}$$

If  $\mathcal{F} = \langle M, R \rangle$  is a Kripke frame, then  $\langle M, R, \models \rangle$  is a Kripke model for **IPL**<sup>+</sup> based on  $\mathcal{F}$ .

The following *heredity condition* holds for  $\models$ : for any  $\mathcal{L}'$ -formula  $A$  and any  $x, y \in M$ , if  $x \models A$  and  $xRy$ , then  $y \models A$ .

**Definition 3.** An  $\mathcal{L}'$ -formula  $A$  is true in a Kripke model  $\langle M, R, \models \rangle$  for **IPL**<sup>+</sup> if  $x \models A$  for any  $x \in M$ , and is valid on a Kripke frame  $\mathcal{F} = \langle M, R \rangle$  if it is true for every Kripke model for **IPL**<sup>+</sup> based on  $\mathcal{F}$ . An  $\mathcal{L}'$ -formula  $A$  is said to be **IPL**<sup>+</sup>-valid if  $A$  is valid on every Kripke frame. Let  $\Gamma \cup \{A\}$  be a

set of  $\mathcal{L}'$ -formulas. Semantic consequence (entailment) is defined in terms of truth preservation at each state:  $\Gamma \models A$  if for every Kripke model  $\langle M, R, \models \rangle$  for  $\mathbf{IPL}^+$  and for all  $x \in M$ ,  $x \models A$  if  $x \models B$  for all  $B \in \Gamma$ . We define the logic  $\mathbf{IPL}^+$  model-theoretically as the pair  $\langle \mathcal{L}', \{\Gamma, A \mid \Gamma \models A\} \rangle$ .

We turn to the language  $\mathcal{L}$  and define *four* separate valuation functions  $\models^+$ ,  $\models^-$ ,  $\models^m$ , and  $\models^n$ . These mappings determine for a given propositional variable  $p$ , the set of states that support the truth, the falsity, the meaningfulness, and the nonsensicality (meaninglessness) of  $p$ , respectively. Support of truth, support of falsity, support of meaningfulness, and support of meaninglessness are seen as properties that are independent of each other. In particular, it is not excluded that an information state supports both the truth and the falsity of a given propositional variable or both its meaningfulness and its nonsensicality.

**Definition 4.** *The valuation functions  $\models^+$ ,  $\models^-$ ,  $\models^m$ , and  $\models^n$  on a Kripke frame  $\langle M, R \rangle$  are mappings from the set  $\Phi$  to the power set  $2^M$  of  $M$  such that for any  $\star \in \{+, -, m, n\}$ , any  $p \in \Phi$  and any  $x, y \in M$ , if  $x \in \models^\star(p)$  and  $xRy$ , then  $y \in \models^\star(p)$ . We will write  $x \models^\star p$  for  $x \in \models^\star(p)$ . The functions  $\models^+$ ,  $\models^-$ ,  $\models^m$ , and  $\models^n$  are extended to mappings from the set of all formulas to  $2^M$  by:*

- 1)  $x \models^+ A \wedge B$  iff  $x \models^+ A$  and  $x \models^+ B$ ,  
 $x \models^+ A \vee B$  iff  $x \models^+ A$  or  $x \models^+ B$ ,  
 $x \models^+ A \rightarrow B$  iff  $\forall y \in M [xRy \text{ and } y \models^+ A \text{ imply } y \models^+ B]$ ,  
 $x \models^+ \sim A$  iff  $x \models^- A$ ,  
 $x \models^+ [m]A$  iff  $x \models^m A$ ,  
 $x \models^+ [n]A$  iff  $x \models^n A$ ,
- 2)  $x \models^- A \wedge B$  iff  $x \models^- A$  or  $x \models^- B$ ,  
 $x \models^- A \vee B$  iff  $x \models^- A$  and  $x \models^- B$ ,  
 $x \models^- A \rightarrow B$  iff  $x \models^+ A$  and  $x \models^- B$ ,  
 $x \models^- \sim A$  iff  $x \models^+ A$ ,  
 $x \models^- [m]A$  iff  $x \models^n A$ ,  
 $x \models^- [n]A$  iff  $x \models^m A$ ,
- 3)  $x \models^m A \circ B$  iff  $x \models^m A$  and  $x \models^m B$ , for  $\circ \in \{\wedge, \vee, \rightarrow\}$ ,  
 $x \models^m \circ A$  iff  $x \models^m A$ , for  $\circ \in \{\sim, [m], [n]\}$ ,
- 4)  $x \models^n A \circ B$  iff  $x \models^n A$  or  $x \models^n B$ , for  $\circ \in \{\wedge, \vee, \rightarrow\}$ ,  
 $x \models^n \circ A$  iff  $x \models^n A$ , for  $\circ \in \{\sim, [m], [n]\}$ .

If  $\mathcal{F} = \langle M, R \rangle$  is a Kripke frame, then  $\langle M, R, \models^+, \models^-, \models^m, \models^n \rangle$  is a Kripke model for  $\mathbf{N4mn}$  based on  $\mathcal{F}$ .



The heredity condition holds for  $\models^+$ ,  $\models^-$ ,  $\models^m$ , and  $\models^n$ , i.e., for any  $\mathcal{L}$ -formula  $A$  and any  $x, y \in M$ , if  $x \models^* A$  and  $xRy$ , then  $y \models^* A$ , for  $* \in \{+, -, m, n\}$ .

As to a motivation of the semantical clauses for  $[m]$  and  $[n]$ , we may note that a compound formula is meaningful (nonsensical) iff all (some) of its immediate proper subformulas are; meaninglessness is ‘infectious’. Thus, in particular,  $x \models^m [n]A$  iff  $x \models^m A$ , and  $x \models^m [n]A$  does not, in general, imply  $x \models^+ [n]A$ . For the statement that  $A$  is nonsensical to be meaningful,  $A$  must be meaningful, although  $[n]A$  may well be false.

**Definition 5.** An  $\mathcal{L}$ -formula  $A$  is said to be true in a Kripke model for **N4mn**  $\langle M, R, \models^+, \models^-, \models^m, \models^n \rangle$  if  $x \models^+ A$  for any  $x \in M$ , and to be valid on a Kripke frame  $\mathcal{F} = \langle M, R \rangle$  if it is true for every Kripke model for **N4mn** based on  $\mathcal{F}$ . An  $\mathcal{L}$ -formula  $A$  is said to be **N4mn**-valid if  $A$  is valid on every Kripke frame. Let  $\Gamma \cup \{A\}$  be a set of  $\mathcal{L}$ -formulas. Entailment is defined in terms of support-of-truth preservation at each state:  $\Gamma \models^+ A$  if for all Kripke models for **N4mn**  $\langle M, R, \models^+, \models^-, \models^m, \models^n \rangle$  and for all  $x \in M$ ,  $x \models^+ A$  if  $x \models^+ B$  for all  $B \in \Gamma$ . We write  $A \models^+ B$  for  $\{A\} \models^+ B$ . We define the logic **N4mn** model-theoretically as the pair  $\langle \mathcal{L}, \{\Gamma, A \mid \Gamma \models^+ A\} \rangle$  and **N4** is model-theoretically defined as  $\langle \mathcal{L}'', \{\Gamma, A \mid \Gamma \models^+ A\} \rangle$ .

**Proposition 1.** Each of the unary connectives  $\circ \in \{\sim, [m], [n]\}$  is congruentiality-breaking in the sense that there are  $\mathcal{L}$ -formulas  $A$  and  $B$  such that  $A \models^+ B$  and  $B \models^+ A$  but not:  $\circ A \models^+ \circ B$  and  $\circ B \models^+ \circ A$ .

**Definition 6.** Given the set  $\Phi$  of propositional variables, we define three more sets of propositional variables, namely  $\Phi^- := \{p^- \mid p \in \Phi\}$ ,  $\Phi^m := \{p^m \mid p \in \Phi\}$ , and  $\Phi^n := \{p^n \mid p \in \Phi\}$ . We inductively define a mapping  $f$  from  $\text{Form}_{\mathcal{L}}(\Phi)$  to the set of formulas of the language  $\mathcal{L}'$  of **IPL**<sup>+</sup> defined over  $\Phi \cup \Phi^- \cup \Phi^m \cup \Phi^n$  as follows:

- 1) for any  $p \in \Phi$ ,  $f(p) := p$ ,  $f(\sim p) := p^-$ ,  $f([m]p) := p^m$ ,  $f([n]p) := p^n$ ,
- 2)  $f(A \circ B) := f(A) \circ f(B)$  for  $\circ \in \{\rightarrow, \wedge, \vee\}$ ,
- 3)  $f(\sim(A \wedge B)) := f(\sim A) \vee f(\sim B)$ ,
- 4)  $f(\sim(A \vee B)) := f(\sim A) \wedge f(\sim B)$ ,
- 5)  $f(\sim(A \rightarrow B)) := f(A) \wedge f(\sim B)$ ,
- 6)  $f(\sim\sim A) := f(A)$ ,
- 7)  $f(\sim[m]A) := f([n]A)$ ,
- 8)  $f(\sim[n]A) := f([m]A)$ ,
- 9)  $f([m](A \circ B)) := f([m]A) \wedge f([m]B)$ , for  $\circ \in \{\rightarrow, \wedge, \vee\}$ ,
- 10)  $f([m] \circ A) := f([m]A)$ , for  $\circ \in \{\sim, [m], [n]\}$ ,
- 11)  $f([n](A \circ B)) := f([n]A) \vee f([n]B)$ , for  $\circ \in \{\rightarrow, \wedge, \vee\}$ ,

12)  $f([n] \circ A) := f([n]A)$ , for  $\circ \in \{\sim, [m], [n]\}$ .

We write  $f(\Gamma)$  to denote the result of replacing every occurrence of a formula  $A$  in  $\Gamma$  by an occurrence of  $f(A)$ ; thus,  $f(\emptyset) = \emptyset$ .

**Lemma 1.** *Let  $f$  be the function defined in Definition 6. For any Kripke model for  $\mathbf{N4mn}$   $\langle M, R, \models^+, \models^-, \models^m, \models^n \rangle$ , we can define a Kripke model for  $\mathbf{Int}^+$   $\langle M, R, \models \rangle$  such that for any  $A \in \text{Form}_{\mathcal{L}}(\Phi)$  and any  $x \in M$ ,*

- (1)  $x \models^+ A$  iff  $x \models f(A)$ ,
- (2)  $x \models^- A$  iff  $x \models f(\sim A)$ ,
- (3)  $x \models^m A$  iff  $x \models f([m]A)$ ,
- (4)  $x \models^n A$  iff  $x \models f([n]A)$ .

**Lemma 2.** *Let  $f$  be the function defined in Definition 6. For any Kripke model  $\langle M, R, \models \rangle$  for  $\mathbf{IPL}^+$ , we can construct a Kripke model  $\langle M, R, \models^+, \models^-, \models^m, \models^n \rangle$  for  $\mathbf{N4mn}$  such that for any  $\mathcal{L}$ -formula  $A$  and any  $x \in M$ ,*

- 1)  $x \models f(A)$  iff  $x \models^+ A$ ,
- 2)  $x \models f(\sim A)$  iff  $x \models^- A$ ,
- 3)  $x \models f([m]A)$  iff  $x \models^m A$ ,
- 4)  $x \models f([n]A)$  iff  $x \models^n A$ .

**Theorem 1** (Semantical embedding). *Let  $f$  be the mapping from Definition 6. For any set of  $\mathcal{L}$ -formulas  $\Gamma \cup A$ ,  $\Gamma \models^+ A$  in  $\mathbf{N4mn}$  iff  $f(\Gamma) \models f(A)$  in  $\mathbf{IPL}^+$ .*

### 3.1. A tetralateral sequent calculus for $\mathbf{N4mn}$

We define a tetralateral sequent calculus  $\text{SN4mn}$  for  $\mathbf{N4mn}$  that makes use of four different sequent arrows by generalizing a combination of the sequent calculi  $\text{Sn4}$  and  $\text{Dn4}$  from [3]. A sequent is an expression of the form,

$$\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* A$$

where  $\Gamma_1, \dots, \Gamma_4$  are finite, possibly empty multisets of  $\mathcal{L}$ -formulas,  $A$  is an  $\mathcal{L}$ -formula, and  $*$   $\in \{+, -, m, n\}$ . For a singleton multiset  $\{A\}$  we usually write just  $A$ , and  $A, \Gamma$  as well as  $\Gamma, A$  ( $\Delta, \Gamma$  as well as  $\Gamma, \Delta$ ) designates the union of the multisets  $\Gamma$  and  $\{A\}$  ( $\Delta$  and  $\Gamma$ ).

**Definition 7.** *Let  $*$   $\in \{+, -, m, n\}$ ,  $\circ \in \{\sim, [m], [n]\}$ , and  $\sharp \in \{\wedge, \vee, \rightarrow\}$ . The sequent calculus  $\text{SN4mn}$  is given by the following sequents and sequent rules. The axiomatic sequents of  $\text{SN4mn}$  are of the form:*

$$\begin{array}{ll} p : \emptyset : \emptyset : \emptyset \Rightarrow^- p & \emptyset : p : \emptyset : \emptyset \Rightarrow^+ p \\ \emptyset : \emptyset : p : \emptyset \Rightarrow^m p & \emptyset : \emptyset : \emptyset : p \Rightarrow^n p \end{array}$$

for any  $p \in \Phi$ , where  $\emptyset$  is the empty multiset.

The structural rules of SN4mn are of the form:

$$\begin{array}{c}
\frac{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^- A \quad A, \Gamma'_1 : \Gamma'_2 : \Gamma'_3 : \Gamma'_4 \Rightarrow^* C}{\Gamma_1, \Gamma'_1 : \Gamma_2, \Gamma'_2 : \Gamma_3, \Gamma'_3 : \Gamma_4, \Gamma'_4 \Rightarrow^* C} \text{ (cut-)} \\
\frac{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^+ A \quad \Gamma'_1 : A, \Gamma'_2 : \Gamma'_3 : \Gamma'_4 \Rightarrow^* C}{\Gamma_1, \Gamma'_1 : \Gamma_2, \Gamma'_2 : \Gamma_3, \Gamma'_3 : \Gamma_4, \Gamma'_4 \Rightarrow^* C} \text{ (cut+)} \\
\frac{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^m A \quad \Gamma'_1 : \Gamma'_2 : A, \Gamma'_3 : \Gamma'_4 \Rightarrow^* C}{\Gamma_1, \Gamma'_1 : \Gamma_2, \Gamma'_2 : \Gamma_3, \Gamma'_3 : \Gamma_4, \Gamma'_4 \Rightarrow^* C} \text{ (cutm)} \\
\frac{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^n A \quad \Gamma'_1 : \Gamma'_2 : \Gamma'_3 : A, \Gamma'_4 \Rightarrow^* C}{\Gamma_1, \Gamma'_1 : \Gamma_2, \Gamma'_2 : \Gamma_3, \Gamma'_3 : \Gamma_4, \Gamma'_4 \Rightarrow^* C} \text{ (cutn)} \\
\frac{A, A, \Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C}{A, \Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C} \text{ (co-)} \quad \frac{\Gamma_1 : A, A, \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C}{\Gamma_1 : A, \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C} \text{ (co+)} \\
\frac{\Gamma_1 : \Gamma_2 : A, A, \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C}{\Gamma_1 : \Gamma_2 : A, \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C} \text{ (com)} \quad \frac{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : A, A, \Gamma_4 \Rightarrow^* C}{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : A; \Gamma_4 \Rightarrow^* C} \text{ (con)} \\
\frac{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C}{A, \Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C} \text{ (we-)} \quad \frac{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C}{\Gamma_1 : A, \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C} \text{ (we+)} \\
\frac{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C}{\Gamma_1 : \Gamma_2 : A, \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C} \text{ (wem)} \quad \frac{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C}{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : A, \Gamma_4 \Rightarrow^* C} \text{ (wen)}.
\end{array}$$

The introduction rules for unary connectives in succedent position of sequents are of the form:

$$\begin{array}{c}
\frac{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^- A}{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^+ \sim A} (\sim r+) \quad \frac{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^+ A}{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^- \sim A} (\sim r-) \\
\frac{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^m A}{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^+ [m]A} ([m]r+) \quad \frac{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^n A}{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^- [m]A} ([m]r-) \\
\frac{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^n A}{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^+ [n]A} ([n]r+) \quad \frac{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^m A}{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^- [n]A} ([n]r-) \\
\frac{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^m A}{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^m \circ A} (\circ rm) \quad \frac{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^n A}{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^n \circ A} (\circ rn).
\end{array}$$

The introduction rules for unary connectives in antecedent position of sequents are of the form:

$$\begin{array}{c}
\frac{A, \Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C}{\Gamma_1 : \sim A, \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C} (\sim l+) \quad \frac{\Gamma_1 : A, \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C}{\sim A, \Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C} (\sim l-) \\
\frac{\Gamma_1 : \Gamma_2 : A, \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C}{\Gamma_1 : [m]A, \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C} ([m]l+) \quad \frac{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : A, \Gamma_4 \Rightarrow^* C}{[m]A, \Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C} ([m]l-)
\end{array}$$

$$\frac{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : A, \Gamma_4 \Rightarrow^* C}{\Gamma_1 : [n]A, \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C} ([n]l+) \quad \frac{\Gamma_1 : \Gamma_2 : A, \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C}{[n]A, \Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C} ([n]l-)$$

$$\frac{\Gamma_1 : \Gamma_2 : A, \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C}{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \circ A, \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C} (\circ lm) \quad \frac{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : A, \Gamma_4 \Rightarrow^* C}{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \circ A, \Gamma_4 \Rightarrow^* C} (\circ ln).$$

The positive inference rules for the binary connectives of SN4mn are of the form:

$$\frac{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^+ A \quad \Gamma'_1 : B, \Gamma'_2 : \Gamma'_3 : \Gamma'_4 \Rightarrow^* C}{\Gamma_1, \Gamma'_1 : A \rightarrow B, \Gamma_2, \Gamma'_2 : \Gamma_3, \Gamma'_3 : \Gamma_4, \Gamma'_4 \Rightarrow^* C} (\rightarrow l+)$$

$$\frac{\Gamma_1 : A, \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^+ B}{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^+ A \rightarrow B} (\rightarrow r+)$$

$$\frac{\Gamma_1 : A, B, \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C}{\Gamma_1 : A \wedge B, \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C} (\wedge l+)$$

$$\frac{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^+ A \quad \Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^+ B}{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^+ A \wedge B} (\wedge r+)$$

$$\frac{\Gamma_1 : A, \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C \quad \Gamma_1 : B, \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C}{\Gamma_1 : A \vee B, \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C} (\vee l+)$$

$$\frac{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^+ A}{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^+ A \vee B} (\vee r1+)$$

$$\frac{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^+ B}{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^+ A \vee B} (\vee r2+).$$

The negative inference rules for the binary connectives of SN4mn are of the form:

$$\frac{B, \Gamma_1 : A, \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C}{A \rightarrow B, \Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C} (\rightarrow l-)$$

$$\frac{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^+ A \quad \Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^- B}{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^- A \rightarrow B} (\rightarrow r-)$$

$$\frac{A, \Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C \quad B, \Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C}{A \wedge B, \Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C} (\wedge l-)$$

$$\frac{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^- A}{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^- A \wedge B} (\wedge r1-)$$

$$\frac{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^- B}{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^- A \wedge B} (\wedge r2-)$$

$$\frac{A, \Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C}{A \vee B, \Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C} (\vee l1-)$$

$$\frac{B, \Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C}{A \vee B, \Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C} (\vee l2-)$$

$$\frac{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^- A \quad \Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^- B}{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^- A \vee B} (\vee r-).$$

The  $m$ -related inference rules for the binary connectives of SN4mn are of the form:

$$\frac{\Gamma_1 : \Gamma_2 : A, B, \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C}{\Gamma_1 : \Gamma_2 : A \# B, \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^* C} (\# lm)$$

$$\frac{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^m A \quad \Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^m B}{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^m A \sharp B} (\sharp r m).$$

The  $n$ -related inference rules for the binary connectives of SN4mn are of the form:

$$\frac{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : A, \Gamma_4 \Rightarrow^* C \quad \Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : B, \Gamma_4 \Rightarrow^* C}{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : A \sharp B, \Gamma_4 \Rightarrow^* C} (\sharp l n)$$

$$\frac{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^n A}{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^n A \sharp B} (\sharp r 1 n) \quad \frac{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^n B}{\Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^n A \sharp B} (\sharp r 2 n).$$

**Proposition 2.** In SN4mn, for any  $\mathcal{L}$ -formula  $A$ ,

1.  $\vdash A : \emptyset : \emptyset : \emptyset \Rightarrow^- A$ ,
2.  $\vdash \emptyset : A : \emptyset : \emptyset \Rightarrow^+ A$ ,
3.  $\vdash \emptyset : \emptyset : A : \emptyset \Rightarrow^m A$ ,
4.  $\vdash \emptyset : \emptyset : \emptyset : A \Rightarrow^n A$ .

### 3.2. Syntactical embedding, cut-elimination, decidability, and completeness

We syntactically embed SN4mn into Gentzen's sequent calculus LJ<sup>+</sup> for IPL<sup>+</sup>. From this embedding we obtain the admissibility of SN4mn's cut-rules, the decidability of SN4mn, and its completeness with respect to the class of all models for N4mn. A sequent of LJ<sup>+</sup> is an ordinary sequent, i.e., an expression of the form  $\Gamma \Rightarrow A$  where  $\Gamma$  is a finite multiset of  $\mathcal{L}'$ -formulas and  $A$  is an  $\mathcal{L}'$ -formula. We consider  $\mathcal{L}'$  defined over  $\Phi \cup \Phi^- \cup \Phi^m \cup \Phi^n$ .

**Theorem 2** (Syntactical embedding). *Let  $f$  be the mapping from Definition 6. For any finite multiset of  $\mathcal{L}$ -formulas  $\Gamma_1 \cup \Gamma_2 \cup \Gamma_3 \cup \Gamma_4 \cup \{A\}$  we have:*

- (a) (1)  $\vdash \Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^+ A$  in SN4mn iff  
 $\vdash f(\sim\Gamma_1), f(\Gamma_2), f([m]\Gamma_3), f([n]\Gamma_4) \Rightarrow f(A)$  in LJ<sup>+</sup>;
- (2)  $\vdash \Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^- A$  in SN4mn iff  
 $\vdash f(\sim\Gamma_1), f(\Gamma_2), f([m]\Gamma_3), f([n]\Gamma_4) \Rightarrow f(\sim A)$  in LJ<sup>+</sup>;
- (3)  $\vdash \Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^m A$  in SN4mn iff  
 $\vdash f(\sim\Gamma_1), f(\Gamma_2), f([m]\Gamma_3), f([n]\Gamma_4) \Rightarrow f([m]A)$  in LJ<sup>+</sup>;
- (4)  $\vdash \Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^n A$  in SN4mn iff  
 $\vdash f(\sim\Gamma_1), f(\Gamma_2), f([m]\Gamma_3), f([n]\Gamma_4) \Rightarrow f([n]A)$  in LJ<sup>+</sup>.
- (b) (1)  $\vdash \Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^+ A$  in SN4mn- $\{(\text{cut}^+), (\text{cut}^-), (\text{cut}^m), (\text{cut}^n)\}$   
iff  
 $\vdash f(\sim\Gamma_1), f(\Gamma_2), f([m]\Gamma_3), f([n]\Gamma_4) \Rightarrow f(A)$  in LJ<sup>+</sup> - (cut);
- (2)  $\vdash \Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^- A$  in SN4mn- $\{(\text{cut}^+), (\text{cut}^-), (\text{cut}^m), (\text{cut}^n)\}$   
iff  
 $\vdash f(\sim\Gamma_1), f(\Gamma_2), f([m]\Gamma_3), f([n]\Gamma_4) \Rightarrow f(\sim A)$  in LJ<sup>+</sup> - (cut);
- (3)  $\vdash \Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^m A$  in SN4mn- $\{(\text{cut}^+), (\text{cut}^-), (\text{cut}^m), (\text{cut}^n)\}$   
iff  
 $\vdash f(\sim\Gamma_1), f(\Gamma_2), f([m]\Gamma_3), f([n]\Gamma_4) \Rightarrow f([m]A)$  in LJ<sup>+</sup> - (cut);

- (4)  $\vdash \Gamma_1 : \Gamma_2 : \Gamma_3 : \Gamma_4 \Rightarrow^n A$  in SN4mn- $\{(\text{cut}+), (\text{cut}-), (\text{cut}m), (\text{cut}n)\}$   
iff  
 $\vdash f(\sim\Gamma_1), f(\Gamma_2), f([m]\Gamma_3), f([n]\Gamma_4) \Rightarrow f([n]A)$  in LJ<sup>+</sup> - (cut).

**Theorem 3** (Cut-admissibility). *The rules (cut+), (cut-), (cutm), and (cutn) are admissible in cut-free SN4mn.*

As a corollary to cut-admissibility one obtains the subformula property for SN4mn, i.e., if a sequent  $s$  is provable in SN4mn, then there is a proof  $\pi$  of  $s$  such that all formulas appearing in  $\pi$  are subformulas of some formula in  $s$ . Moreover, by the decidability of LJ<sup>+</sup>, for each  $\mathcal{L}$ -formula  $A$ , it is possible to decide whether  $f(A)$  is provable in LJ<sup>+</sup>. Then, by the syntactical embedding theorems, SN4mn is decidable.

**Theorem 4** (Completeness). *Let  $\Gamma = \{A_1, \dots, A_n\} \cup \{A\}$  be a set of  $\mathcal{L}$ -formulas, let  $\bigwedge \Gamma$  be the conjunction  $(\dots (A_1 \wedge A_2) \wedge \dots \wedge A_n)$ , and let  $\bigwedge \emptyset$  be the formula  $p \rightarrow p$  for some fixed  $p \in \Phi$ . Then  $\Gamma \models^+ A$  in N4mn iff  $\emptyset : \emptyset : \emptyset : \emptyset \Rightarrow^+ \bigwedge \Gamma \rightarrow A$  is provable in SN4mn.*

## References

- [1] A. Almukdad and D. Nelson, “Constructible Falsity and Inexact Predicates”, *J. Symbolic Logic*, **49** (1984), 231–233.
- [2] *Inconsistency Tolerance*, LNCS 3300, eds. L. Bertossi, A. Hunter, Torsten Schaub, Springer, 2005.
- [3] N. Kamide and H. Wansing, “Proof Theory of Nelson’s Paraconsistent Logic: A Uniform Perspective”, *Theoretical Computer Sci.*, **6** (2012), 1–38.
- [4] S.P. Odintsov and H. Wansing, “Inconsistency-tolerant Description Logic. Motivation and Basic Systems”, *Trends in Logic. 50 Years of Studia Logica*, eds. V. Hendricks, J. Malinowski, Kluwer, Dordrecht, 2003, 301–335.
- [5] S.P. Odintsov and H. Wansing, “Inconsistency-tolerant Description Logic. Part II: Tableau Algorithms”, *J. Applied Logic*, **6** (2008), 343–360.
- [6] H. Omori and H. Wansing, “40 years of FDE: An Introductory Overview”, *Studia Logica*, **105** (2017), 1021–1049.
- [7] D. Ripley, “Paradoxes and Failures of Cut”, *Australasian J. Philosophy*, **91** (2013), 139–164.

- [8] D. Ripley, “Bilateralism, Coherence, Warrant”, *Act-Based Conceptions of Propositional Content: Contemporary and Historical Perspectives*, eds. F. Moltmann, M. Textor, OUP, 2017, 307–324.
- [9] D. Ripley, “Denial”, *The Oxford Handbook of Negation*, eds. V. Déprez, M.T. Espinal, OUP, 2020, 47–57.
- [10] H. Wansing and S. Ayhan, “Logical multilateralism”, *submitted*, 2021.

# Применение нейронных сетей для распознавания конформационных изменений в структуре белка по рентгеновским дифрактограммам его одиночных молекул на примере фотоцикла бактериородопсина

Г. А. Армеев<sup>1</sup>, М. П. Кирпичников<sup>2</sup>, Г. М. Кобельков<sup>3</sup>,  
А. В. Кудрявцев<sup>4</sup>, М. А. Ложников<sup>5</sup>, В. Н. Новоселецкий<sup>6</sup>,  
А. К. Шайтан<sup>7</sup>, К. В. Шайтан<sup>8</sup>

Лазеры на свободных электронах становятся всё более мощными и доступными установками для определения структуры бел-

---

<sup>1</sup> *Армеев Григорий Алексеевич* — в.н.с. каф. биоинженерии биологического ф-та МГУ, e-mail: sataryu@yandex.ru.

Armeev Grigoriy Alekseevich — leading researcher, Lomonosov Moscow State University, Faculty of biology, Chair of bioengineering

<sup>2</sup> *Кирпичников Михаил Петрович* — заведующий каф. биоинженерии биологического ф-та МГУ, академик, e-mail: kirpichnikov@inbox.ru.

Kirpichnikov Mikhail Petrovich — head of the chair, academician, Lomonosov Moscow State University, Faculty of biology, Chair of bioengineering

<sup>3</sup> *Кобельков Георгий Михайлович* — заведующий каф. вычислительной математики мех.-мат. ф-та МГУ, профессор, e-mail: george.kobelkov@yandex.ru.

Kobelkov Georgiy Mikhailovich — head of the chair, professor, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Mechanics and Mathematics, Chair of Computational Mathematics

<sup>4</sup> *Кудрявцев Александр Викторович* — аспирант каф. биоинженерии биологического ф-та МГУ, e-mail: aleks.kudryavcev@gmail.com.

Kudryavtsev Aleksandr Viktorovich — PhD student, Lomonosov Moscow State University, Faculty of biology, Chair of bioengineering

<sup>5</sup> *Ложников Михаил Андреевич* — ассистент каф. вычислительной математики мех.-мат. ф-та МГУ, e-mail: lozhnikovma@gmail.com.

Lozhnikov Mikhail Andreevich — assistant, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Mechanics and Mathematics, Chair of Computational Mathematics

<sup>6</sup> *Новоселецкий Валерий Николаевич* — доцент каф. биоинженерии биологического ф-та МГУ, e-mail: valery.novoseletsky@yandex.ru.

Novoseletsky Valeriy Nikolaevich — associate professor, Lomonosov Moscow State University, Faculty of biology, Chair of bioengineering

<sup>7</sup> *Шайтан Алексей Константинович* — доцент каф. биоинженерии биологического ф-та МГУ, e-mail: shaytan\_ak@mail.bio.msu.ru.

Shaitan Alexey Konstantinovich — associate professor, Lomonosov Moscow State University, Faculty of biology, Chair of bioengineering

<sup>8</sup> *Шайтан Константин Вольдемарович* — профессор каф. биоинженерии биологического ф-та МГУ, e-mail: shaytan49@yandex.ru.

Shaytan Konstantin Voldemarovich — professor, Lomonosov Moscow State University, Faculty of biology, Chair of bioengineering



ков. Конформационные перестройки характерны для подавляющего большинства белков, однако скоротечность превращений зачастую не допускает получение кристаллов достаточного размера. Выходом могло бы стать получение картин рентгеновской дифракции от одиночных молекул, однако в этом случае нет возможности определять их ориентацию, что делает невозможным восстановление структуры современными методами. В работе рассмотрена применимость ряда архитектур нейронных сетей к распознаванию конформационного состояния белка по данным дифракции на одиночных молекулах бактериородопсина.

**Ключевые слова:** рентгеновская дифракция, нейронные сети, конформационные состояния белка, бактериородопсин

## 1. Введение

Лазер на свободных электронах (ЛСЭ, англ. XFEL — X-ray Free Electron Laser) представляет собой комплекс из источника электронов, их ускорителя, магнитного ондулятора и ловушки электронного пучка. Проходя через ускоритель, электроны разгоняются до высоких энергий и релятивистских скоростей, после чего попадают в ондулятор, образованный последовательностью периодически расположенных дипольных магнитов, которые заставляют электроны двигаться вдоль синусоидальных траекторий. При этом каждый отдельный электрон испускает рентгеновское излучение, которое постепенно усиливается, причем особенности взаимодействия электронов с излучением приводят к формированию его чрезвычайно коротких и интенсивных когерентных вспышек [1]. На данный момент в мире работает или готовятся к вводу в эксплуатацию несколько установок ЛСЭ: LCLS (США, 2009), SACLA (Япония, 2011), PAL-XFEL (Республика Корея, 2016), SwissFEL (Швейцария, 2016), EuXFEL (Германия, 2016), SHINE (Китай, 2025). ЛСЭ обладают возможностью генерировать вспышки излучения с очень высокой пиковой яркостью [2], а различие между установками состоит в частоте генерации вспышек излучения и максимальной энергии ускоряемых электронов, что влияет на длину волны и количество фотонов во вспышке.

Конечное применение получаемого рентгеновского излучения происходит на экспериментальных станциях [3], ключевыми параметрами которых являются технология фокусировки пучка излучения, технологии подачи образца и параметры детектора дифракционной картины. Так, например, на экспериментальной станции SPB/SFX установки EuXFEL предполагаются следующие параметры [4]: фокусировка пучка до диаметра 1 мкм или 100 нм, подача образца несколькими разными способами (в струе жидкости, с помощью газодинамической форсунки, в виде аэрозоля и с помощью закреплением образца), детектор размером 1024x1024

пикселя с размером пикселя 200x200 мкм на минимальном расстоянии 129 мм от образца.

С точки зрения определения структуры биологических макромолекул перспективным является режим дифракции от одиночных частиц, который позволил бы отказаться от стадии выращивания кристаллов. Однако интенсивность рассеяния в таком режиме сильно меньше, чем при рассеянии на кристаллах или нанокристаллах. Это означает, что для работы в таком режиме необходима высокая частота импульсов, генерируемых установкой, а также стабильность работы всех ее компонент, поскольку для реконструкции необходимы миллионы изображений. Кроме того, особое внимание должно быть уделено способам доставки одиночных молекул в пучок излучения [5].

Ввиду специфики экспериментов на ЛСЭ, особенностей получаемых данных, методы их обработки, а также методы реконструкции по этим данным структуры объектов экспериментов нуждаются в активном развитии [6].

Бактериородопсины (БР) — это семейство мембранных белков, использующих энергию света для конформационных перестроек, приводящих в итоге к однонаправленному переносу протона через мембрану. Со структурной точки зрения БР представляют собой пучки из семи трансмембранных альфа-спиралей, окружающих ковалентно связанный хромофор (ретиаль) в полностью распрямлённой конформации. После поглощения кванта света хромофор переходит в возбуждённое состояние и изомеризуется, изменяя конформацию. Это приводит к ряду структурных перестроек в окружающих его атомах белка, что в итоге приводит к переносу протона, после чего хромофор и белок в целом возвращаются в исходные состояния — этот процесс называется фотоциклом [7].

Вот уже на протяжении 50 лет механизм функционирования БР привлекает к себе неустанный интерес исследователей. Ввиду быстроты происходящих превращений, изучение структурных особенностей этих конформаций до недавнего времени было доступно лишь с помощью методов молекулярного моделирования. Однако в последние годы в связи с развитием ЛСЭ стало возможным экспериментальное наблюдение конформационных перестроек, что позволяет сопоставить экспериментальные и вычислительные методы изучения конформационной подвижности белков. Применительно к ретиаль-содержащим белкам последние данные, которые удалось получить с помощью ЛСЭ для БР, наиболее простого модельного объекта из ретиаль-содержащих белков, предлагают наносекундное разрешение [8].

В задачах классификации картин рассеяния довольно активно применяются алгоритмы распознавания изображений, в том числе методы, основанные на нейронных сетях. Так, например, была предложена глубо-

кая нейронная сеть для классификации кристаллов по данным порошковой рентгеновской дифракции [9]. Другим примером является использование нейронной сети типа AlexNet в задачах классификации дифрактограмм [10]. Кроме того, в этих задачах довольно популярными являются нейронные сети типа VGG [11]. Однако в последнее время в области распознавания изображений были представлены новые алгоритмы, которые пока не набрали популярности в задачах обработки дифракционных картин. Одним из таких алгоритмов является остаточная нейронная сеть типа ResNet. Эта нейронная сеть показывает более высокие результаты, чем сети типа VGG в задачах классификации изображений, например, в таких тестах как CIFAR-10 и ImageNet.

## 2. Архитектура и топология нейросетей

В данной работе произведено сравнение сетей типа VGG [12] и ResNet [13] в задачах обработки дифрактограмм. В частности, были рассмотрены следующие варианты нейронных сетей, которые были использованы для обучения, и проведён подбор параметров для их эффективной работы.

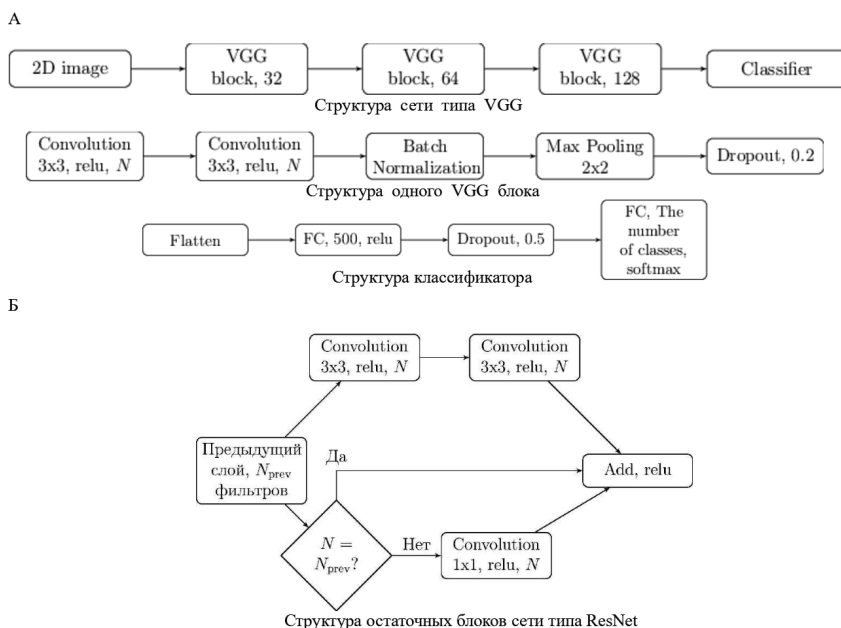


Рис. 1. Архитектуры нейронных сетей, используемые в данной работе.

А. Нейронная сеть типа VGG состоит из нескольких VGG блоков и классификатора (рис. 1, А). В настоящей работе параметры VGG се-

ти были выбраны следующими: использовалось 3 VGG блока глубины 32, 64 и 128 соответственно со значением dropout 0.0, 0.3 и 0.4 соответственно. Классификатор включал в себя полносвязный скрытый слой из 128 нейронов и dropout слой с параметром 0.5.

Б. Нейронная сеть типа ResNet состоит из остаточных блоков (рис. 1, Б), расположенных в стеке, после которых находится классификатор. В работе использовались остаточные нейронные сети ResNet20, ResNet32 и ResNet44 из работы [13] общей глубины в 20, 32 и 44 слоя соответственно.

В. Модификация остаточной нейронной сети, предложенная в работе [14]. Эта нейронная сеть показывает несколько лучшие результаты при классификации изображений, чем оригинальная остаточная нейронная сеть. В настоящей работе использовалась модификация ResNet20 общей глубины в 20 слоёв.

### 3. Структуры бактериородопсина

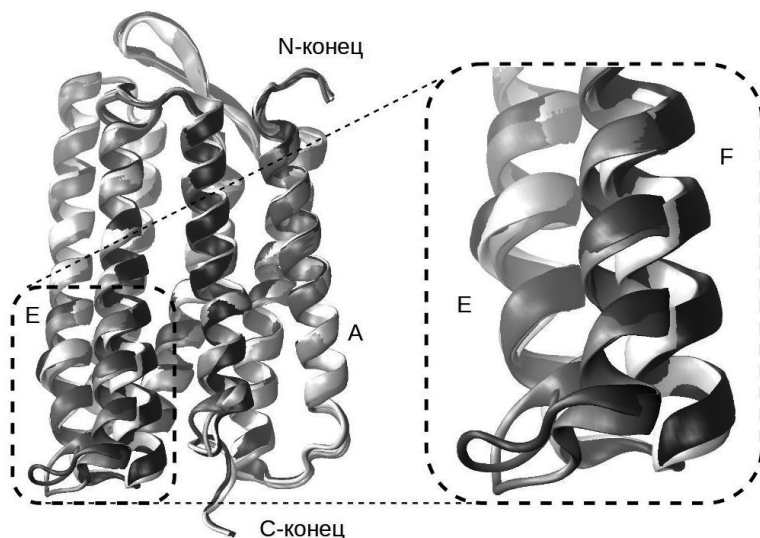


Рис. 2. Конформационные перестройки альфа-спиралей в ходе начальных стадий фотоцикла бактериородопсина (ленточное представление показывает ход основной цепи белка; атомы боковых цепей не показаны). Слева: общий боковой вид четырёх совмещённых конформаций белка, справа крупный план конца спирали E и начала спирали F — области, где различие между конформациями максимально (в конформациях, показанных черным и белым, спираль F прямая, в конформациях, показанных серым и светлосерым, изогнута влево).

Для выяснения возможности определения конформации белка по виду его дифрактограммы были рассмотрены 4 конформации бактериородопсина, соответствующие разным состояниям фотоцикла (идентификаторы в базе данных белковых структур PDB 6RNJ, 6RPH, 6RQO, 6RQP) (рис. 2) [15]. Эти конформации в целом довольно похожи друг на друга, но отличаются положением некоторого числа атомов. Наиболее заметными отличиями является положение одного из концов спирали F.

#### 4. Набор обучающих изображений

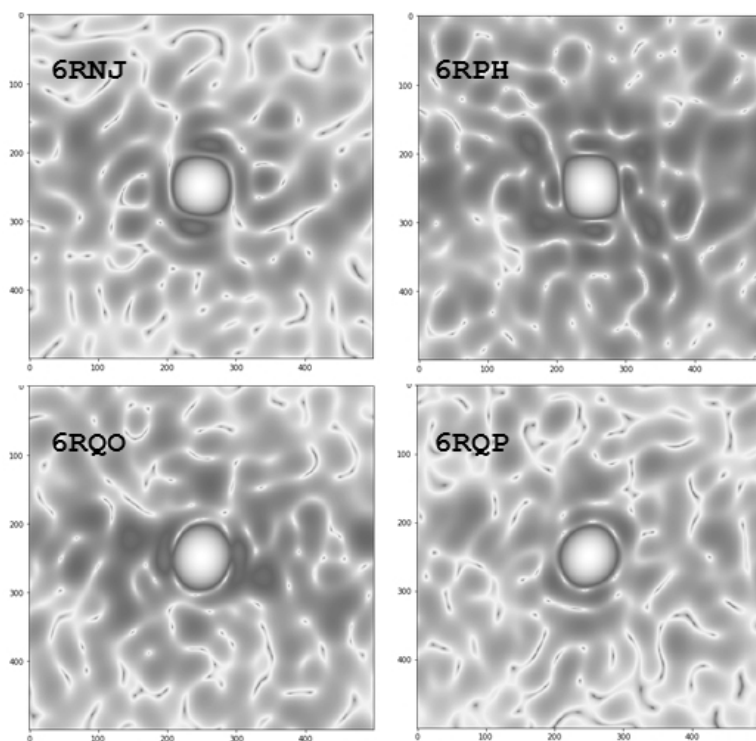


Рис. 3. Примеры расчётных дифракционных картин, полученных от структур бактериородопсина в различных состояниях фотоцикла.

Для обучения нейронных сетей требуется большой объём данных. В то же время, на данный момент не существует достаточно большого набора размеченных данных, полученных в результате экспериментов на рентгеновских лазерах, пригодного для обучения нейронных сетей. Поэтому было решено строить дифракционные изображения методом прямого моделирования дифракции, которое производили при помощи программы Condor [16]. Для каждой структуры было получено 4000 дифрак-

тограмм в условиях, приближенных к реальным (случайная ориентация молекулы относительно пучка, размер детектора 1 мегапиксель, размер пикселя 200 мкм, расстояние до детектора 0,7 м, энергия пучка 1 мДж) (Рис. 3). Размер обучающей выборки составил 12000 изображений, размер тестовой выборки составил 4000 изображений.

## 5. Результаты

Все нейросети продемонстрировали возможность распознавания состояния фотовозбуждения вне зависимости от числа мономеров в предъявленной картине рассеяния (Рис. 4, Таблица 1). Наиболее точный прогноз дают нейронные сети VGG и ResNet20. Более глубокие нейронные сети переобучаются на предложенных данных. Полученный в данном разделе работы результат говорит о перспективности применения нейросетевых алгоритмов при классификации образцов, гетерогенных по стадии фоточикла.

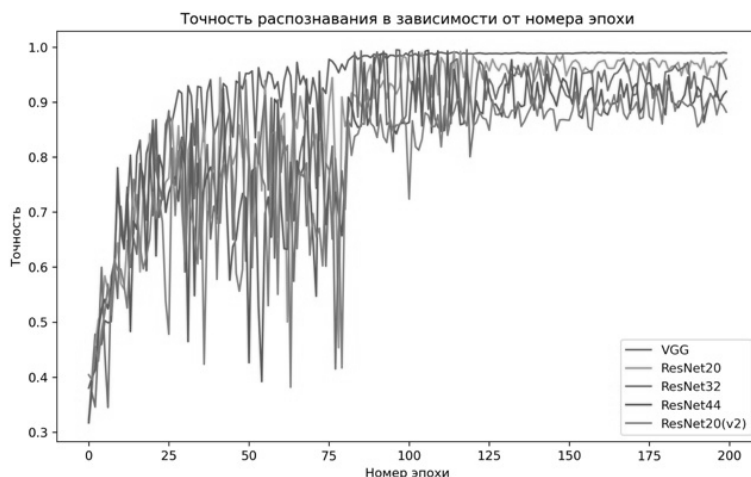


Рис. 4. График точности распознавания конформации бактериородопсина в зависимости от номера эпохи и типа использованной нейросети.

Нейронная сеть	VGG	ResNet20	ResNet32	ResNet44	ResNet20(v2)
Точность после 200 эпох обучения	0.989	0.978	0.943	0.919	0.882
Время обучения (Ч:ММ)	2:32	3:35	5:38	7:43	5:59

Таблица 1. Сводная таблица результатов обучения нейросетей.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (№18-02-40010мега) и Междисциплинарных научно-образовательных школ Московского университета «Молекулярные технологии живых систем и синтетическая биология» и «Мозг, когнитивные системы, искусственный интеллект».

## Список литературы

- [1] Zhukovsky K.V., “Undulators and generation of X-ray pulses in free-electron lasers with self-amplified spontaneous emission”, *Moscow University Physics Bulletin*, **72:2** (2017), 128–143.
- [2] Oberthür D., “Biological single-particle imaging using XFELs — towards the next resolution revolution”, *IUCrJ*, **5:6** (2018), 663–666.
- [3] Tschentscher T., Bressler C., Grünert J., Madsen A., Mancuso A. P., Meyer M., Scherz A., Sinn H., Zastra U., “Photon Beam Transport and Scientific Instruments at the European XFEL”, *Applied Sciences*, **7:6** (2017), 592.
- [4] Mancuso A. P., Aquila A., Borchers G., Giewekemeyer K., Reimers N., “Scientific instrument single particles, clusters, and biomolecules (SPB)”, *XFEL. EU Technical Report*, 2013, 1–232.
- [5] Shaitan K. V., Armeev G. A., Shaytan A. K., “The dynamics of irreversible evaporation of a water–protein droplet and the problem of structural and dynamic experiments with single molecules”, *Biophysics*, **61:2** (2016), 177–184.
- [6] Шайтан К. В., Шайтан А. К., Багров Д. В., Блинов В. Н., Новоселецкий В. Н., Соколова О. С., Шуруп Д. Л., Турченков Д. А., Кирпичников М. П., “Алгоритмы и методы исследования трехмерных атомистических моделей молекул белков на основе анализа картины рассеяния мощного рентгеновского лазерного излучения”, *Наноструктуры. Математическая физика и моделирование*, **9:2** (2013), 33–74.
- [7] Lueck H., Schobert B., Richter H. T., Cartailier J. P., Lanyi J. K., “Structural changes in bacteriorhodopsin during ion transport at 2 angstrom resolution”, *Science*, **286:5438** (1999), 255–260.
- [8] Nango E., Royant A., Kubo M., Nakane T., Wickstrand C., Kimura T., et al, “A three-dimensional movie of structural changes in bacteriorhodopsin”, *Science*, **354:6319** (2016), 1552–1557.

- [9] Park W. B., Chung J., Jung J., Sohn K., Singh S. P., Pyo M., Shin N., Sohn K.-S., “Classification of crystal structure using a convolutional neural network”, *IUCrJ*, **4**:4 (2017), 486–494.
- [10] Xu W., LeBeau J. M., “A deep convolutional neural network to analyze position averaged convergent beam electron diffraction patterns”, *Ultramicroscopy*, **188** (2018), 59–69.
- [11] Ke T. W., Brewster A. S., Yu S. X., Ushizima D., Yang C., Sauter N. K., “A convolutional neural network-based screening tool for X-ray serial crystallography”, *Journal of synchrotron radiation*, **25**:3 (2018), 655–670.
- [12] Simonyan K., Zisserman A., *Very deep convolutional networks for large-scale image recognition*, 2014, arXiv:1409.1556.
- [13] He K., Zhang X., Ren S., Sun J., “Deep residual learning for image recognition”, *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2016, 770–778.
- [14] He K., Zhang X., Ren S., Sun J., “Identity mappings in deep residual networks”, *European conference on computer vision*, 2016, 630–645.
- [15] Weinert T., Skopintsev P., James D., Dworkowski F., Panepucci E., Kekilli D., et al., “Proton uptake mechanism in bacteriorhodopsin captured by serial synchrotron crystallography”, *Science*, **365**:6448 (2019), 61–65.
- [16] Hantke M. F., Ekeberg T., Maia F. R. N. C., “Condor: a simulation tool for flash X-ray imaging”, *Journal of Applied Crystallography*, **49**:4 (2016), 1356–1362.

**Application of neural networks for recognition of conformational changes in protein structure by X-ray diffractograms of its single molecules on the example of bacteriorhodopsin photocycle**  
**Armeev G.A., Kirpichnikov M.P., Kobelkov G.M., Kudryavtsev A.V., Lozhnikov M.A., Novoseletsky V.N., Shaitan A.K., Shaytan K.V.**

Free electron lasers are becoming increasingly powerful and affordable installations for determining the structure of proteins. Conformational rearrangements are characteristic of the vast majority of proteins, but the transience of transformations often does not allow obtaining crystals of sufficient size. The solution could be to obtain X-ray diffraction patterns from single molecules, but in this case it is



not possible to determine their orientation, which makes it impossible to restore the structure by modern methods. The paper considers the applicability of a number of neural network architectures to the recognition of the conformational state of a protein based on diffraction data on single bacteriorhodopsin molecules.

**Keywords:** X-ray diffraction, neural networks, conformational states of protein, bacteriorhodopsin

## References

- [1] Zhukovsky K.V., “Undulators and generation of X-ray pulses in free-electron lasers with self-amplified spontaneous emission”, *Moscow University Physics Bulletin*, **72**:2 (2017), 128–143.
- [2] Oberthür D., “Biological single-particle imaging using XFELs — towards the next resolution revolution”, *IUCrJ*, **5**:6 (2018), 663–666.
- [3] Tschentscher T., Bressler C., Grünert J., Madsen A., Mancuso A. P., Meyer M., Scherz A., Sinn H., Zastra U., “Photon Beam Transport and Scientific Instruments at the European XFEL”, *Applied Sciences*, **7**:6 (2017), 592.
- [4] Mancuso A. P., Aquila A., Borchers G., Giewekemeyer K., Reimers N., “Scientific instrument single particles, clusters, and biomolecules (SPB)”, *XFEL. EU Technical Report*, 2013, 1–232.
- [5] Shaitan K. V., Armeev G. A., Shaytan A. K., “The dynamics of irreversible evaporation of a water–protein droplet and the problem of structural and dynamic experiments with single molecules”, *Biophysics*, **61**:2 (2016), 177–184.
- [6] Shaitan K. V., Shaytan A. K., Bagrov D. V., Blinov V. N., Novoseletsky V. N., Sokolova O. S., Shurov D. L., Turchenkov D. A., Kirpichnikov M. P., “Algorithms and methods for the study of 3D atomistic models of proteins based on the analysis of the diffraction patterns of the high-power X-ray laser radiation”, *Nanostructures. Mathematical physics and modeling*, **9**:2 (2013), 33–74 (In Russian).
- [7] Lueck H., Schobert B., Richter H. T., Cartailier J. P., Lanyi J. K., “Structural changes in bacteriorhodopsin during ion transport at 2 angstrom resolution”, *Science*, **286**:5438 (1999), 255–260.
- [8] Nango E., Royant A., Kubo M., Nakane T., Wickstrand C., Kimura T., et al, “A three-dimensional movie of structural changes in bacteriorhodopsin”, *Science*, **354**:6319 (2016), 1552–1557.

- [9] Park W. B., Chung J., Jung J., Sohn K., Singh S. P., Pyo M., Shin N., Sohn K.-S., “Classification of crystal structure using a convolutional neural network”, *IUCrJ*, **4**:4 (2017), 486–494.
- [10] Xu W., LeBeau J. M., “A deep convolutional neural network to analyze position averaged convergent beam electron diffraction patterns”, *Ultramicroscopy*, **188** (2018), 59–69.
- [11] Ke T. W., Brewster A. S., Yu S. X., Ushizima D., Yang C., Sauter N. K., “A convolutional neural network-based screening tool for X-ray serial crystallography”, *Journal of synchrotron radiation*, **25**:3 (2018), 655–670.
- [12] Simonyan K., Zisserman A., *Very deep convolutional networks for large-scale image recognition*, 2014, arXiv:1409.1556.
- [13] He K., Zhang X., Ren S., Sun J., “Deep residual learning for image recognition”, *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2016, 770–778.
- [14] He K., Zhang X., Ren S., Sun J., “Identity mappings in deep residual networks”, *European conference on computer vision*, 2016, 630–645.
- [15] Weinert T., Skopintsev P., James D., Dworkowski F., Panepucci E., Kekilli D., et al., “Proton uptake mechanism in bacteriorhodopsin captured by serial synchrotron crystallography”, *Science*, **365**:6448 (2019), 61–65.
- [16] Hantke M. F., Ekeberg T., Maia F. R. N. C., “Condor: a simulation tool for flash X-ray imaging”, *Journal of Applied Crystallography*, **49**:4 (2016), 1356–1362.

# Машинное обучение систем интеллектуального управления

А. И. Дивеев<sup>1</sup>

Рассматривается машинное обучение интеллектуальных систем управления методами символьной регрессии. Методы символьной регрессии позволяют находить математические выражения для различных задач, где необходимо найти структуру и параметры неизвестной многомерной функции. Поиск неизвестной функции осуществляется генетическим алгоритмом на пространстве кодов метода символьной регрессии. В качестве искомым функций могут быть функции, содержащие операторы условия, которые являются обязательной составной частью программ интеллектуальных систем управления.

**Ключевые слова:** методы символьной регрессии, синтез управления, машинное обучение, оптимальное управление.

## 1. Введение

Сегодня искусственный интеллект, несмотря на большое количество определений, является программой, работающей в вычислительном устройстве. Основным элементом программы искусственного интеллекта является оператор условия "if". Следовательно, если мы говорим о машинном обучении искусственного интеллекта, то это означает использование математических конструкций, которые в автоматическом режиме создают операторы условия. Формально оператор условия можно получить из ступенчатой функции Хэвисайда или функции знака. Например, программный оператор  $\text{if } a < 0 \text{ then } y \leftarrow b \text{ else } y \leftarrow c$ , записывается с помощью функции Хэвисайда  $\vartheta(a)$  следующим образом  $y = (1 - \vartheta(a))b + \vartheta(a)c$ . Но следует отметить, что и математических конструкций, в которых в качестве решений, например при интегрировании каких-то дифференциальных уравнений, появляются функции Хэвисайда, также нет.

Допустим рассматривается задача автоматической парковки автомобиля при условии, что на стоянке находятся другие автомобили. Иногда возможен плавный маневр без переключения направления движения.

---

<sup>1</sup> Дивеев Асхат Ибрагимович — главный научный сотрудник Федерального исследовательского центра "Информатика и управление" Российской Академии наук, e-mail: aidiveev@mail.ru.

Diveev Askhat Ibragimovich — chief researcher, Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences

Но в большинстве случаев плотная парковка требует движения вперед-назад, при этом количество переключений зависит от расположения автомобилей, их габаритов и других факторов. Заранее не известно, сколько операторов условия должно быть в решении. Чтобы найти решение необходимо найти функцию управления, которая из разных начальных состояний переводит объект в терминальное состояние с учетом фазовых ограничений. Формально рассматривается задача общего синтеза управления [1]. Проблема ее решения состоит в том, что функция управления является разрывной с заранее неизвестным количеством точек разрыва.

Ранее при поиске функции исследователь на основе анализа и интуиции задавал ее структуру с точностью до значений параметров. Далее с помощью вычислительных методов находил оптимальные значения этих параметров. Возможно использование универсальных параметрических аппроксимирующих функций, структура которых регулярно усложняется в зависимости от сложности задачи. Для одномерных функций – это ряды, число членов которых зависит от сложности задачи. Для аппроксимации многомерных функций в последнее время используются искусственные нейронные сети, в которых при обучении ищется большое количество параметров, а число слоев нейронной сети зависит от сложности аппроксимируемой функции. Усложнение задач интеллектуального управления приводит к существенному увеличению количества искомых параметров и делает невозможным параметрический поиск функции или параметрическое обучение.

Методы символьной регрессии, появившиеся в конце двадцатого века [2], для автоматического написания программ позволяют искать структуру и параметры функции одновременно. Все методы символьной регрессии кодируют математическое выражение в форме специального кода и ищут решение генетическим алгоритмом на пространстве кодов. Методы символьной регрессии использовались для решения задач управления для синтеза блока управления на основе типовых блоков [3], но не для поиска математического выражения функции управления. В работе [4] предложено искать функцию управления методом генетического программирования и этот процесс назван машинным обучением управления, хотя в работе не представлено ни одной решенной задачи синтеза управления.

В настоящее время существует более десяти методов символьной регрессии [5], [6], которые успешно применяются для решения задачи общего синтеза управления или в современном тренде машинного обучения управления.

## 2. Методы символьной регрессии

Первый метод символьной регрессии, метод генетического программирования, кодирует математическое выражение в виде вычислительного дерева. Для кодирования необходимо иметь базовое множество элементарных функций, которые размещаются в узлах дерева, а на ветвях дерева размещаются аргументы и параметры. Генетический алгоритм при выполнении операции скрещивания отбирает два возможных решения, устанавливает случайно узлы для скрещивания и обменивает поддерева, начинающиеся с этих узлов. В результате получаем два новых дерева, которые являются кодами новых математических выражений. Генетическое программирование имеет существенный недостаток, коды разных математических выражений имеют разную длину.

Для устранения недостатков генетического программирования были созданы другие методы символьной регрессии. Метод Декартового генетического программирования [7] кодирует математическое выражение в виде наборов целочисленных векторов, первая компонента которого указывает на номер элементарной функции, а остальные компоненты на номера аргументов. Если аргументов больше, чем требуется для функции, то остальные аргументы не используются. После вычисления элементарной функции ее результат добавляется ко множеству аргументов и может быть использован в последующих вызовах функций. Коды Декартового генетического программирования имеют одинаковую длину, при этом часть кода не используется.

Основной недостаток большинства методов символьной регрессии - нарушение свойства наследования при выполнении операции скрещивания. Новые возможные решения, полученные после выполнения операции скрещивания, не оказываются непохожими на своих "родителей". Это обстоятельство соответствует генерации новых возможных решений и эволюционный поиск становится случайным.

В 2006 году был разработан метод сетевого оператора [8] специально для решения задачи синтеза управления. В методе использовался принцип малых вариаций базисного решения. Согласно этому принципу кодом сетевого оператора кодируется только одно базисное решение. Остальные возможные решения кодируются как малые вариации базисного решения. Каждая малая вариация кодируется целочисленным вектором. Каждое возможное решение представляет собой набор целочисленных векторов малых вариаций. Операция скрещивания выполняется на наборах векторов малых вариаций.

Принцип малых вариаций базисного решения является универсальным [9], [10] и может применяться для решения различных нечисловых

задач оптимизации, в которых метрика пространства поиска не связана со значением целевого функционала.

Применение принципа малых вариаций базисного решения для различных методов символьной регрессии позволяет улучшить его возможности при поиске оптимального математического выражения. В работе [11] приведено сравнение и показано преимущество метода вариационного Декартового генетического программирования, использующего принцип малых вариаций базисного решения, перед обычным Декартовым генетическим программированием.

### 3. Примеры машинного обучения управления

В классической монографии [12] приведено полное решение задачи общего синтеза управления для линейного объекта второго порядка

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= u,\end{aligned}$$

где

$$-1 \leq u \leq 1.$$

В задаче необходимо попасть из любой точки пространства состояний в терминальную точку начала координат

$$\mathbf{x}^f = [0 \ 0]^T,$$

за минимальное время

$$J = t_f \rightarrow \min.$$

В качестве решения задачи было получено следующее управление

$$u = 1 - 2\vartheta(y(x_1, x_2)),$$

где  $\vartheta(a)$  - функция Хэвисайда

$$\vartheta(a) = \begin{cases} 1, & \text{если } a \geq 0 \\ 0 & \text{- иначе} \end{cases},$$

$$y(x_1, x_2) = \begin{cases} 1, & \text{если } x_1 \geq 0, x_2 \geq 0 \\ x_1 - 0.5x_2^2 & \text{- если } x_1 \geq 0, x_2 < 0 \\ -1, & \text{если } x_1 < 0, x_2 \leq 0 \\ x_1 + 0.5x_2^2 & \text{- если } x_1 < 0, x_2 > 0 \end{cases}.$$

При этом вставленные в решение операторы условия были результатом анализа множества экстремалей, полученных при решении системы с предельными значениями управления.

Для решения этой же задачи методом сетевого оператора было выбрано 20 начальных условий и функционал представлял собой сумму точности и времени попадания в терминальное состояние из всех начальных условий

$$J = \sum_{i=1}^{20} \left( t_{f,i} + \|\mathbf{x}^f - \mathbf{x}(t_{f,i}, \mathbf{x}^{0,i})\| \right) \rightarrow \min,$$

где  $\mathbf{x}(t, \mathbf{x}^{0,i})$  - частное решение системы дифференциальных уравнений модели из начального условия  $\mathbf{x}^{0,i}$ ,  $i = 1, \dots, 20$ .

В результате было получено следующее решение

$$u = h(\mathbf{x}^f - \mathbf{x}) = \begin{cases} 1, & \text{если } \tilde{u} \geq 1 \\ -1, & \text{если } \tilde{u} \leq -1 \\ \tilde{u} & \text{иначе} \end{cases},$$

где

$$\begin{aligned} \tilde{u} &= \arctan(A) + B^{-1} + C^3, \\ A &= B + \arctan \left( q_1 \operatorname{sgn}(x_1^f - x_1) \sqrt{|x_1^f - x_1|} \right), \\ B &= q_1(C + \operatorname{sgn}(C) \exp(-|C|)), \\ C &= q_2(x_2^f - x_2) + (C + \operatorname{sgn}(C) \operatorname{sgn}(x_1^f - x_1) \sqrt{|x_1^f - x_1|}), \end{aligned}$$

$q_1 = 11.3342$ ,  $q_2 = 8.1389$ .

Полученная в результате машинного обучения функция управления обеспечивает построение поля экстремалей, совпадающее с высокой точностью с аналитическим решением из всех начальных условий, в том числе и не входящих в обучающую выборку.

Рассмотрим задачу остановки между двумя препятствиями автомобильного робота

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= u_1 \cos(x_3), \\ \dot{x}_2 &= u_1 \sin(x_3), \\ \dot{x}_3 &= u_1 L^{-1} \tan(u_2), \end{aligned}$$

где  $L = 4$ ,

$$\begin{aligned} -5 &= u_1^- \leq u_1 \leq u_1^+ 5, \\ -1 &= u_2^- \leq u_2 \leq u_2^+ 1. \end{aligned}$$

Робот имеет четыре угла и фазовые ограничения также представляли собой два прямоугольных препятствия, поэтому проверка условий нарушения фазовых ограничений содержала 16 неравенств.

При синтезе функции управления использовалось четыре начальных условия. Функционал качества включал сумму времени попадания в терминальное состояние, точность попадания и штраф за нарушение фазовых ограничений из каждого начального состояния.

В результате машинного обучения управления методом вариационного генетического программирования была получена следующая функция управления

$$u_i = \begin{cases} u_i^+, & \text{если } \tilde{u}_i \geq u_i^+ \\ u_i^-, & \text{если } \tilde{u}_i \leq u_i^- \\ \tilde{u}_i - \text{ иначе} \end{cases}, \quad i = 1, 2,$$

где

$$\tilde{u}_1 = q_1 \Delta_1,$$

$$\tilde{u}_2 = f_{3,1}((\arctan(\Delta_2) - \arctan^3(\Delta_2))^{-1}, \max\{0, \text{sgn}(\Delta_2), q_1\}) \text{sgn}(R) \sqrt{|R|},$$

$$R = f_{3,2}(\vartheta(\min\{q_2, \Delta_3\}), \text{sgn}(\Delta_3) \sqrt{|\mu(\Delta_3)|} + \Delta_3, P),$$

$$P = f_{3,3}(\Delta_3, q_3 \vartheta(\max\{q_4, \Delta_1^2\} + q_1)),$$

$$f_{3,1}(a, b, c) = \begin{cases} c, & \text{если } a \leq b \\ -c - \text{ иначе} \end{cases},$$

$$f_{3,2}(a, b, c) = \begin{cases} b, & \text{если } (a \leq b) \wedge (b < c) \\ a, & \text{если } (a > b) \wedge (a > c) \\ c - \text{ иначе} \end{cases},$$

$$f_{3,3}(a, b, c) = \begin{cases} b - a, & \text{если } |a - b| < |a - c| \\ c - a - \text{ иначе} \end{cases},$$

$$\mu(a) = \begin{cases} a, & \text{если } |a| < 1 \\ \text{sgn}(a) - \text{ иначе} \end{cases},$$

$\Delta_1 = x_1^f - x_1$ ,  $\Delta_2 = x_2^f - x_2$ ,  $\Delta_3 = x_3^f - x_3$ ,  $q_1 = 15.3208$ ,  $q_2 = 13.6169$ ,  $q_3 = 1.5159$ ,  $q_4 = 2.8013$ .

Полученное в результате машинного обучения управление переводит мобильный робот из всех начальных условий в терминальное без нарушения ограничений за минимальное время.



## Заключение

Основной отличительной особенностью систем интеллектуального управления является наличие в их программных реализациях большого количества операторов условия. Большинство математических методов не получают в качестве решения оператор условия. Методы символьной регрессии позволяют находить структуру и параметры математического выражения функции управления с помощью эволюционного алгоритма. Методы обеспечивают встраивание в функцию управления необходимое количество операторов условия, поэтому методы символьной регрессии следует использовать для синтеза или машинного обучения интеллектуальных систем управления. В дальнейших исследованиях необходимо совершенствовать алгоритмы машинного обучения управления методами символьной регрессии.

## Список литературы

- [1] Болтянский В.Г., *Математические методы оптимального управления*, «Наука», Москва, 1969, 408 с.
- [2] Koza, J.R., *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*, MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1992, 840 pp.
- [3] Koza, J.R., Keane, M.A., Streeter, M.J., Mydlowec, W., Yu, J., Lanza, G., *Genetic Programming IV: routine human-competitive intelligence.*, Springer, New York. USA, 2005, 590 pp.
- [4] Duriez, T., Brunton, S.L., Noack, B.R., *Machine Learning Control – Taming Nonlinear Dynamics and Turbulence*, Springer, Switzerland, 2017, 212 pp.
- [5] Дивеев А.И., *Численные методы решения задачи синтеза управления*, РУДН, Москва, 2019, 192 с.
- [6] Diveev, A.I., Shmalko E.Yu., *Machine Learning Control by Symbolic Regression*, Springer, Switzerland, 2021, 158 pp.
- [7] Miller, J., Thomson, P., “Cartesian Genetic Programming”, *Lecture Notes in Computer Science. Proceedings of the European Conference on Genetic Programming (EuroGP2000)*, **1802** (2000), 121–132
- [8] Дивеев А.И., Софронова Е.А., *Метод сетевого оператора и его применение в задачах управления*, РУДН, Москва, 2012, 182 с.

- [9] Diveev, A.I., “Small Variations of Basic Solution Method for Non-numerical Optimization jour IFAC-PapersOnLine”, **48:25** (2015), 028—033
- [10] Diveev, A.I., Sofronova, E.A., “Universal Approach to Solution of Optimization Problems by Symbolic Regression”, *Applied Sciences*, **11:5081** (2021)
- [11] Diveev, A.I., Shmalko E.Yu., “Machine-Made Synthesis of Stabilization System by Modified Cartesian Genetic Programming”, *IEEE Transactions on Cybernetics, Early Access Article*, 2020
- [12] Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф., *Математическая теория оптимальных процессов*, 4, Наука, Москва, 1983, 392 с.

## **Machine Learning of Intelligent Control Systems**

### **Diveev A.I.**

Machine learning intelligent control systems by symbolic regression methods is considered. Symbolic regression allows to find mathematical expressions for various problems where it is necessary to find structure and parameters of unknown multidimensional function. The search for an unknown function is carried out by a genetic algorithm in code space of symbolic regression method. Functions containing condition operators that are mandatory component of intelligent control systems programs.

*Keywords:* symbolic regression, control synthesis, machine learning, optimal control.

## **References**

- [1] Boltyanskii, V.G., *Mathematical Methods of Optimal Control*, “Science”, Moscow, 1969, 408 (in Russian) c.
- [2] Koza, J.R., *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*, MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1992, 840 pp.
- [3] Koza, J.R., Keane, M.A., Streeter, M.J., Mydlowec, W., Yu, J., Lanza, G., *Genetic Programming IV: routine human-competitive intelligence.*, Springer, New York. USA, 2005, 590 pp.

- [4] Duriez, T., Brunton, S.L., Noack, B.R., *Machine Learning Control – Taming Nonlinear Dynamics and Turbulence*, Springer, Switzerland, 2017, 212 pp.
- [5] Diveev, A.I., *Numerical Methods for Solution of the Control Synthesis Problem*, Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, 2019, 192 (in Russian) c.
- [6] Diveev, A.I., Shmalko E.Yu., *Machine Learning Control by Symbolic Regression*, Springer, Switzerland, 2021, 158 pp.
- [7] Miller, J., Thomson, P., “Cartesian Genetic Programming”, *Lecture Notes in Computer Science. Proceedings of the European Conference on Genetic Programming (EuroGP2000)*, **1802** (2000), 121–132
- [8] Diveev, A.I., Sofronova, E.A., *Network Operator Method and its Application for Problems of Control*, Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, 2012, 182 (in Russian) c.
- [9] Diveev, A.I., “Small Variations of Basic Solution Method for Non-numerical Optimization jour IFAC-PapersOnLine”, **48:25** (2015), 028–033
- [10] Diveev, A.I., Sofronova, E.A., “Universal Approach to Solution of Optimization Problems by Symbolic Regression”, *Applied Sciences*, **11:5081** (2021)
- [11] Diveev, A.I., Shmalko E.Yu., “Machine-Made Synthesis of Stabilization System by Modified Cartesian Genetic Programming”, *IEEE Transactions on Cybernetics, Early Access Article*, 2020
- [12] Pontryagin, L.S., Boltyanskii V.G., Gamkrelidze R.V., Mischenko, E.F., *Mathematical Theory of Optimal Processes*, 4 (in Russian), “Science”, Москва, 1983, 392 c.

# Сервисы искусственного интеллекта в современной экономике

М. И. Лугачев<sup>1</sup>, К. Г. Скрипкин<sup>2</sup>, Р. Д. Гимранов<sup>3</sup>

В настоящее время в мировой экономике наблюдается «парадокс производительности» — вложения в новые информационные технологии не ведут к повышению производительности труда в масштабе экономики в целом.

Предполагаемая причина — доминирование централизованных онлайн платформ в современной цифровой экономике. Развитие искусственного интеллекта (ИИ) усиливает их доминирование за счет концентрации данных для обучения алгоритмов ИИ. Вместе с тем бизнес-модели онлайн платформ были разработаны на рубеже 1990-х — 2000-х гг. и могут оказаться неоптимальными при наличии других метафор, прежде всего, пиринговых сетей.

Ограничение доминирования централизованных онлайн платформ требует изменения политики государства по отношению к централизованным онлайн платформам, включая и ведущих отечественных операторов. Для снижения монопольной власти операторов платформ предлагается разделение операторов на компании, поддерживающие сбор и обработку данных на платформах, и бизнес-операторов, использующих эти данные для оказания услуг конечным пользователям.

**Ключевые слова:** парадокс производительности, централизованная онлайн платформа, бизнес-модель, пиринговая платформа

## 1. Введение

Р. Солоу еще в 1987 году обратил внимание на разрыв между инвестициями в ИТ и ростом производительности в экономике и отсутствие значимой связи между этими параметрами [1]. Позже, в работах середины 1990-х — первой половины 2000-х годов эту связь удалось обнаружить [2]. В дальнейшем был выявлен и основной источник влияния инвестиций в ИТ

---

<sup>1</sup> *Лугачев Михаил Иванович* — профессор каф. Экономической информатики эконом. ф-та МГУ, e-mail: mil@econ.msu.ru.

Lugachev Michael Ivanovich — Professor, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Economics, Chair of Economic Informatics

<sup>2</sup> *Скрипкин Кирилл Георгиевич* — заведующий каф. Экономической информатики эконом. ф-та МГУ.

Scripkin Kirill Georgievich — Lomonosov Moscow State University, Faculty of Economics, head of Chair of Economic Informatics

<sup>3</sup> *Гимранов Ринат Дамирович* — начальник управления информационных технологий ПАО «Сургутнефтегаз».

Gimranov Rinat Damirovich — Head of PAO Surgutneftegaz IT department

на рост производительности — согласованные изменения в компьютерном, организационном и человеческом капитале [3]. Таким образом, парадокс производительности на тот момент был разрешен. Однако, начиная с экономического кризиса 2007-2009 гг., обнаружилось новое снижение темпов роста производительности труда, несмотря на продолжающиеся масштабные инвестиции в ИТ [4]. В чем же причина такого положения?

Основная проблема внедрения масштабных технологических инноваций в том, что они, как правило, не обеспечивают результата при сохранении стратегии, бизнес-процессов и требований к человеческому капиталу [5], а во многих случаях — и при сохранении старой бизнес-модели [6]. Причина этого в том, что между перечисленными объектами наблюдаются значимые комплементарные связи, так что замена одного из них существенно влияет на все остальные [5]. Ядром таких связей выступает бизнес-модель, которая непосредственно влияет и на используемые технологии (ключевые ресурсы и ключевые виды деятельности), и на стратегию (потребительский сегмент, ценностное предложение), и на требования к человеческому капиталу (ключевые ресурсы). Эти связи двунаправленные, поэтому изменение данных элементов может потребовать изменения бизнес-модели.

## 2. Основные понятия

Введем основные определения.

Если отдача от вложения в два актива одновременно превышает отдачу от вложений в любой из этих двух активов, такие активы называют комплементарными друг другу. Именно в этом смысле шла речь о комплементарности между информационными технологиями, бизнес-процессами, требованиями к человеческому капиталу и др.

Цифровая платформа — онлайн бизнес, опосредующий взаимодействие по крайней мере двух разных групп пользователей. Если цифровой платформой управляет единственная компания, мы будем называть такую платформу централизованной, если нет, то децентрализованной.

Технология общего назначения — технология, которая не приносит отдачи сама по себе, но порождает целый кластер прикладных технологий. Примеры — паровая машина, электродвигатель, летательный аппарат тяжелее воздуха, компьютер, интернет.

Бизнес-модель — способ создания ценности в данном бизнесе. Наиболее масштабные технологии общего назначения порождают большие группы бизнес-модели со сходными свойствами.

Естественная монополия — структура рынка, в которой эффективный размер предприятия очень велик, т.е. равен или превышает реальный масштаб отрасли. В этом случае наиболее эффективна единственная

фирма, которая во избежание отрицательных эффектов монополии регулируется государством.

Сетевой эффект (полное название — положительный внешний эффект сети) — присоединение к сети новых пользователей повышает её ценность для уже имеющихся пользователей.

### 3. Основные положения

Как показывает экономическая история, масштабные технологии общего назначения порождают семейства бизнес-моделей с общими характеристиками. В частности, использование энергии пара породило бизнес-модели, основанные на экономии на масштабе, электричества и двигателя внутреннего сгорания — бизнес-модели, основанные на экономии на масштабе и разнообразии, компьютера и интернета добавило к ним бизнес-модели, основанные на механизмах централизованных интернет-платформ. Каждое новое семейство бизнес-моделей не могло быть реализовано средствами предшествующих технологий.

Если искусственный интеллект — столь же важная технология общего назначения, как и вышеперечисленные, он также должен породить новое семейство бизнес-моделей, недоступное для предшествующих технологий. На сегодняшний день таких бизнес-моделей на практике не наблюдается.

Возможная причина этого — доминирование в экономике централизованных интернет-платформ, основанное на трех механизмах:

- высокая экономия на масштабе производства, характерная для информационных технологий;
- высокая экономия на масштабе потребления вследствие сетевого эффекта;
- высокое качество интеллектуальных алгоритмов и их обучения благодаря огромным объемам собираемых данных.

Эти механизмы не только обеспечивают доминирование централизованных платформ, но и позволяют интегрировать в экосистему платформ новейшие технологии. В частности, платформы с их колоссальным количеством пользователей выступают центром притяжения для большинства новых бизнесов.

Наряду с этим, ряд сфер — университетское образование, производственная кооперация, трудовые отношения с высокой специфичностью, управленческое консультирование — на сегодняшний день не вписываются в платформенную модель. Альтернативой ей могут выступить одно-

ранговые (англ. Peer-to-peer) платформы, которые активно предлагаются различными стартапами, но пока не получили значительного развития. В частности, есть основания считать, что основные потенциальные выгоды Индустрии 4.0 связаны именно с новой моделью взаимодействия фирм.

Если централизованная онлайн платформа может рассматриваться как институциональная ловушка, возникает вопрос, можно ли из этой ловушки выбраться.

Для этого предлагается воспользоваться опытом регулирования монополий в области железных дорог, где также большое значение имеют экономия на масштабе и сетевой эффект. Развитые страны разделили управление железнодорожными сетями и их использование для оказания услуг клиентам. Первая сфера рассматривается как естественная монополия, оператором которой выступает государственная компания, как Amtrak в США или British Rail в Великобритании. Во второй сфере поддерживается конкуренция операторов, пользующихся железнодорожной сетью на равных условиях.

Сходное регулирование применимо к централизованным платформам. В этом случае техническая инфраструктура, а также сбор и хранение данных пользователей на этой инфраструктуре может осуществлять естественная монополия под контролем государства, а частным компаниям остается роль операторов цифровых услуг, использующих эту инфраструктуру и эти данные. В настоящее время по этому пути пошло правительство КНР [7].

## 4. Выводы

- 1) Современная волна новых технологий на основе искусственного интеллекта пока не привела к появлению принципиально нового семейства бизнес-моделей.
- 2) Вероятным следствием этого стал парадокс производительности — отсутствие роста производительности при растущих инвестициях в ИТ.
- 3) Вероятная причина отсутствия нового семейства бизнес-моделей — доминирование централизованных онлайн платформ. Последнее поддерживается тремя мощными механизмами: значительной экономией на масштабе производства, сетевыми эффектами, преимуществами при создании и обучении интеллектуальных алгоритмов.
- 4) Предлагаемое решение — разделение централизованных онлайн платформ на две части. Первая часть — техническая инфраструктура

тура и данные — должна стать естественной монополией под контролем государства. Вторая часть — предоставление услуг конечным пользователям — должна остаться частной.

## Список литературы

- [1] Solow R., “We’d Better Watch Out”, *New York Times Book Review*, **36** (1987).
- [2] Brynjolfsson E., Hitt L., “Paradox Lost? Firm-Level Evidence on the Returns to Information Systems Spending”, *Management Science*, **42**:4 (1996), 541–558.
- [3] Brynjolfsson E., Hitt L., Yang S., “Intangible Assets: Computers and Organizational Capital”, *Brookings Papers on Economic Activity*, **2002**:1 (2002), 137–181.
- [4] *OECD Compendium on Productivity Indicators 2019*, [https://www.oecd-ilibrary.org/industry-and-services/oecd-compendium-of-productivity-indicators-2019\\_196c6aab-en](https://www.oecd-ilibrary.org/industry-and-services/oecd-compendium-of-productivity-indicators-2019_196c6aab-en).
- [5] Milgrom P., Roberts J., “The Economics of Modern Manufacturing: Technology, Strategy, and Organization”, *The American Economic Review*, **80**:3 (1990), 511–528.
- [6] Baden-Fuller C., Haefliger S., “Business Models and Technological Innovation”, *Long Range Planning*, **46**:6 (2013), 419–426.
- [7] Yin D., “China is laying the groundwork to nationalize private companies’ data”, *Protocol*, 16.06.2021, <https://www.protocol.com/china/china-national-security-data-exchange>.

### **Artificial Intelligence Services in Modern Economy Lugachev M.I., Skripkin K.G., Gimranov R.D.**

In the contemporary economy, we see evidence of the “productivity paradox” — investments in new information technology do not increase labor productivity on the national economy level.

We suppose that centralized online platforms dominating the modern digital economy are the key drivers of this paradox. Artificial Intelligence (AI) development strengthens their dominance due to the concentration of data necessary for AI algorithms learning. At the same time, the business models of online platforms were developed at the turn of the 1990s – 2000s and may not be optimal in the presence of other metaphors, primarily peer-to-peer networks.

To limit the dominance of centralized online platforms, the government needs to change its policy towards them, including leading domestic operators. To reduce platform operators’ monopoly power, we propose dividing operators into companies that support collecting and processing data on platforms and business operators that use this data to provide end-user services.

**Keywords:** productivity paradox, centralized online platform, business model, peer-to-peer platform



## References

- [1] Solow R., “We’d Better Watch Out”, *New York Times Book Review*, **36** (1987).
- [2] Brynjolfsson E., Hitt L., “Paradox Lost? Firm-Level Evidence on the Returns to Information Systems Spending”, *Management Science*, **42**:4 (1996), 541–558.
- [3] Brynjolfsson E., Hitt L., Yang S., “Intangible Assets: Computers and Organizational Capital”, *Brookings Papers on Economic Activity*, **2002**:1 (2002), 137–181.
- [4] *OECD Compendium on Productivity Indicators 2019*, [https://www.oecd-ilibrary.org/industry-and-services/oecd-compendium-of-productivity-indicators-2019\\_196c6aab-en](https://www.oecd-ilibrary.org/industry-and-services/oecd-compendium-of-productivity-indicators-2019_196c6aab-en).
- [5] Milgrom P., Roberts J., “The Economics of Modern Manufacturing: Technology, Strategy, and Organization”, *The American Economic Review*, **80**:3 (1990), 511–528.
- [6] Baden-Fuller C., Haefliger S., “Business Models and Technological Innovation”, *Long Range Planning*, **46**:6 (2013), 419–426.
- [7] Yin D., “China is laying the groundwork to nationalize private companies’ data”, *Protocol*, 16.06.2021, <https://www.protocol.com/china/china-national-security-data-exchange>.

# Автоматический анализ тональности текстов: проблемы и методы

Н. В. Лукашевич<sup>1</sup>

В данной работе представлен краткий обзор задач анализа тональности, а также проблем и используемых подходов. В последние годы в задачах анализа тональности активно применяются методы машинного обучения. В статье рассматриваются основные подходы машинного обучения и их особенности. На примере одного из датасетов для русского языка рассмотрен прогресс методов в задаче анализа тональности.

**Ключевые слова:** анализ тональности, таргетированный анализ тональности, лексикон оценочной лексики, машинное обучение, нейронная сеть, BERT.

## 1. Введение

Задача анализа тональности текста, т.е. выявление мнения некоторого лица (автора или субъекта, упомянутого в тексте) по поводу сущности или темы, обсуждаемых в тексте, является одной из активно развивающихся технологий в сфере автоматической обработки текстов в последнее десятилетие.

Задачи анализа тональности можно подразделить на две основные группы: общий анализ тональности и таргетированный анализ тональности. При общем анализе тональности задача системы – определить тональность автора для целого текста или фрагмента текста, например, для отзыва пользователя или поста социальной сети.

При таргетированном анализе тональности нужно определять тональность по отношению к заданной цели [1, 2], например, компании или продукту. При аспектном анализе тональности целью анализа являются аспекты (характеристики или части) некоторой сущности, например, в отзыве о ресторане необходимо извлечь отношение пользователя к еде, обслуживанию или обстановке – все эти оценки могут различаться. Еще одним видом таргетированного анализа является извлечение позиции пользователя по некоторой теме (stance detection), например, к вакцинации. Наконец, можно ставить целью извлечь отношения упоминаемых сущностей друг к другу (оценочные отношения) [3].

---

<sup>1</sup>Лукашевич Наталья Валентиновна — ведущий научный сотрудник НИВЦ МГУ, e-mail: louk\_nat@mail.ru.

Loukachevitch Natalia Valentinovna — leading researcher, Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center.

Как и во многих других задачах автоматической обработки текстов, в задачах анализа тональности могут использоваться два основных типа подходов: алгоритмические методы на основе словарей и правил [3, 4] и методы на основе машинного обучения, для которых необходимо создавать размеченные вручную данные с примерами правильного решения задачи, а затем использовать специальные методы для обучения моделей автоматической разметки [1, 2]. Существуют и комбинированные методы, в которых словари оценочной лексики используются как компонент модели машинного обучения [5].

В данной статье будут рассмотрены имеющиеся словари оценочной лексики для русского языка, которые нужны для методов анализа тональности, основанных на знаниях. Мы также опишем проблемы, которые препятствуют созданию качественных алгоритмических подходов для анализа тональности. Наконец, будет представлена классификация методов машинного обучения, которые применялись в задачах анализа тональности. Прогресс методов машинного обучения будет продемонстрирован на данных тестирования таргетированного анализа тональности для русского языка SentiRuEval-2015 [6].

## 2. Словари в задаче тональности для русского языка

Обычно предполагается, что тональность выражается с помощью оценочной (тональной) лексики, что представляет собой эксплицитный способ выражения мнения. Поэтому большое внимание уделяется разработке словарей оценочной лексики [7]. Словари могут создаваться на основе автоматической обработки текстовых коллекций, существующих толковых словарей и структурированных лексико-семантических ресурсов (тезаурусов). Для отбора лексики могут использоваться мнения экспертов или носителей языка, в последнем случае собирается некоторое множество мнений от разных людей (так называемый краудсорсинг). Рассмотрим примеры известных словарей оценочной лексики для русского языка и применяемые для их создания подходы.

В работе [9] описывается подход к автоматическому созданию словаря оценочной лексики в области товаров и услуг для русского языка ProductSentiRus. Словарь ProductSentiRus был получен применением модели машинного обучения, обученной для извлечения оценочных слов на основе совокупности их признаков, к наборам отзывов пользователей в нескольких предметных областях. Словарь представлен как список 5 тысяч слов, упорядоченных по мере снижения вычисленной вероятности их оценочности без указания позитивной или негативной тональности.

Словарь Linis-Crowd [10] создавался для анализа тональности текстов социальных сетей. Для создания словаря сначала из нескольких ресурсов были собраны слова-кандидаты, включая наиболее частотные прилагательные русского языка, употребляемые в текстах социальных сетей, образованные от них наречия, словарь ProductSentiRus [9] и др. Далее была произведена контекстная оценка тональности собранных слов, а также текстов, в которых они употреблялись, методом краудсорсинга по шкале от -2 (сильно негативный) до +2 (сильно позитивный). Оценки различных разметчиков усреднялись.

Словарь RuSentiLex [4] содержит слова и словосочетания, которые несут в себе оценочный компонент, включая явную оценку (*хороший*), эмоции (*грустно*) или коннотации, т.е. негативные или позитивные ассоциации (*кража*). Для составления словаря сначала были порождены списки слов-кандидатов на основе тезауруса RuTез [8], существующих словарей оценочной лексики, новостных статей и постов Твиттера, затем лингвисты анализировали полученные списки для формирования итогового словаря. Словарь содержит более десяти тысяч слов и выражений, выражающих оценку тональности. Если у многозначных слов тональность слова различается для некоторых значений, то тональность указана с точностью до значения.

Словарь фреймов RuSentiFrames [11] описывает тональности и эффекты, которые ассоциируются с участниками некоторой ситуации, выражаемой словом-предикатом, чаще всего глаголом или отглагольным существительным (например, *доверять, помощь*). Фрейм объединяет несколько слов и выражений, близких по смыслу и с одинаковыми ассоциированными тональностями (эффектами). Лексикон RuSentiFrames содержит следующую информацию, которая дает дополнительные возможности для анализа тональности текстов: отношение автора к участникам ситуации, позитивные или негативные отношения между участниками ситуации, позитивные или негативные эффекты относительно участников ситуации и др. В настоящее время лексикон содержит 311 фреймов с более чем 7 тысячами ассоциированных слов и выражений.

Более подробный список словарей оценочной лексики для русского языка представлен в работе [7].

### **3. Факторы, усложняющие анализ тональности текстов на естественном языке**

Факторы, усложняющие анализ тональности, можно разделить на несколько групп. К первой группе можно отнести проблемы, связанные

с изменением базовой тональности слова или выражения в конкретной предметной области (**Лексические факторы**).

Таким усложняющим фактором является многозначность оценочной лексики – некоторые слова в одних значениях могут быть нейтральными, а в других значениях иметь некоторую тональность. Например, слово *пресный* в словосочетании “пресная вода” является нейтральным, возможно с некоторой положительной ассоциацией. В то время как в других значениях “пресный на вкус”, и “пресный как неинтересный” данное слово несет негативную оценку [4].

Также слово может менять свою полярность или терять полярность в зависимости от предметной области, оставаясь при этом в одном и том же значении. Например, слова *подлый* и *предательство* не должны входить в словари оценочных слов, применяемых для анализа отзывов о фильмах, поскольку не могут использоваться для оценки собственно фильмов и их аспектов. Если эти слова встречаются в отзывах зрителей, то относятся к пересказу содержания фильма. Слово или выражение может приобрести явную тональность в некоторой предметной области без изменения значения в связи с тем, что мнение может высказываться имплицитно, с помощью так называемых оценочных фактов, т.е. формально сообщается некоторый факт, а читатель уже может сделать вывод об оценке исходя из своих знаний о мире. Например, в отзывах о ресторанах могут встретиться фразы “долго ждали” или “в супе плавают мухи”, что, с одной стороны, описывает происходящее (сообщает реальные факты), с другой стороны сообщает и оценку этому происходящему. Согласно определению [2] имплицитное мнение (оценка) – это объективное высказывание, из которого следует оценка, т.е. имплицитное мнение сообщается посредством упоминания желательного или нежелательного факта.

Очевидно, что анализ таких имплицитных форм тональности особенно сложен, поскольку в значительной мере зависит от предметной области. Таким образом, если даже для некоторого языка имеется лексикон оценочной лексики, то для анализа тональности с использованием словаря в конкретной предметной области, общий словарь должен настраиваться на конкретную предметную область: пополняться и частично даже очищаться. В частности, в словарь должны вноситься слова, связанные с типичными позитивными или негативными оценочными фактами в этой предметной области.

Вторая группа проблем анализа тональности связана с контекстом использования оценочной лексики, когда исходная тональность слова (выражения) меняется в контексте его использования (**Контекстные факторы**). В частности оценочное слово может встретиться в контексте объемлющего устойчивого выражения, названия. Например, слово

*великий* не является выражением мнения пользователя в выражении “Великая отечественная война”, поскольку это устоявшееся названия исторического события.

Часто появление оценочных слов в тексте может сопровождаться словами-модификаторами, которые усиливают (например, *очень, более*), снижают (*слишком, менее*) или преобразуют в обратную исходную тональность (например, отрицание, частицы *не, нет*), которая ассоциируется с данными словом. Таким образом, при анализе тональности нужно учитывать такие модификаторы и иметь некоторую численную модель, которая модифицирует исходные полярности слова.

Еще одним контекстным фактором является так называемый нереальный контекст (ирреалис), при котором сообщаемое в предложении не относится к тому, что реально происходит. Например, в предложении “Мы надеялись, что фильм нам понравится” употребляется слово *понравится* с положительной тональностью, однако здесь ничего не говорится о том, понравился ли фильм на самом деле, т.е. в процессе автоматического анализа тональности данное слово не должно учитываться, как свидетельство позитивного отношения к фильму. Алгоритмическим решением может быть обнаружение таких контекстов по характерным признакам и снижение вклада оценочных слов внутри этих контекстов в общую оценку по тексту [3].

Третья группа усложняющих факторов связана с выражением иронии или сарказма. Под иронией понимается высказывание, содержание которого противоположно тому, что буквально сказано. Чаще всего под формально нейтральной или позитивной формой скрывается негативная тональность. Сарказм рассматривается как более резкая, агрессивная, возможно унижающая форма высказывания. Автоматическое распознавание в тексте иронии или сарказма очень сложно, требует подготовки специально размеченных текстовых данных [12]. В то же время стоит отметить, что доля таких явлений в текстах значительно меньше, чем ранее упомянутых усложняющих факторов.

## 4. Методы анализа тональности

Перечисленные в предыдущем разделе факторы значительно усложняют автоматический анализ тональности, что делает очень трудоемким применение алгоритмических методов. Поэтому большую популярность в задачах анализа тональности приобрели методы машинного обучения.

Применяемые методы машинного обучения в задачах анализа тональности могут быть разделены на три подкласса, что соответствует и некоторым историческим периодам развития методов машинного обучения в целом.

**Классические методы машинного обучения**, такие как Наивный байесовский классификатор, логистическая регрессия, метод опорных векторов (с начала 2000х годов до 2015 года) [13]. При этих подходах основным представлением текстов для классификации является векторное представление текстов на основе слов текста, к которым могут быть добавлены дополнительные признаки, например биграммы слов, знаки препинания, расположение в тексте и др. Существенной проблемой данных методов является то, что обучение в значительной степени зависит от конкретных слов, которые были в обучающей выборке – если в тестовых примерах появляются новые, отсутствующие в обучающей выборке слова, несущие существенную информацию для классификации, то методы не могут их учесть.

**Классические нейронные сети**, включая рекуррентные нейронные сети (чаще всего сети LSTM) и сверточные нейронные сети [14]. Данные методы стартуют с представлений слов в виде так называемых распределенных векторных представлений (эмбеддингов), которые обычно предобучаются на больших текстовых коллекциях, соответствующих задаче. Обучение эмбеддингов происходит так, чтобы близкие по смыслу слова получали похожие вектора. Поэтому в этих подходах снижается проблема появления новых слов в тестовой коллекции: если слово имеет векторное представление, то это представление может уже нести некоторую информацию о смысле слова, которое может быть учтено моделью. Вторая особенность нейронных сетей состоит в том, что и в рекуррентной, и в сверточной нейронной сети есть механизмы для учета последовательностей слов, поэтому при этих подходах нет необходимости специально прописывать биграммы и другие последовательности слов как признаки для представления анализируемых текстов.

**Походы на основе трансформеров** С 2019 года появились новые нейросетевые походы на основе архитектуры трансформер. В частности, модель BERT на основе трансформеров [15] предобучается на больших объемах текстовых данных и формирует контекстуализированные векторные представления слов, которые зависят от контекста слова. Такие контекстуализированные векторные представления могут быть далее использованы в различных нейросетевых архитектурах для решения различных задач. Использование архитектуры типа BERT привело к росту качества решения различных задач автоматической обработки текстов, включая задачи анализа тональности.

Изначально модель BERT обучалась на многоязычных текстовых коллекциях. В последующих исследованиях было выявлено, что дообучение BERT на коллекциях конкретного естественного языка или конкретной предметной области позволяет улучшать результаты решения задач для этого языка, этой области. В частности, в работе [16] описы-

вается дообучение исходной модели BERT для русского языка - модель RuBERT, в работе [17] такая же технология используется для обучения модели RuBERT для анализа текстов на русском языке в области компьютерной безопасности.

Рассмотрим, как менялось качество, достигаемое в задачах анализа тональности, на примере датасета SentiRuEval-2015 [6], в котором требовалось предсказать, насколько позитивной, негативной или нейтральной является информация в постах Твиттера по отношению к телекоммуникационным операторам. Основной мерой в этом тестировании 2015 года считалась средняя F-мера между позитивным и негативным классом, поскольку чаще всего необходимо найти именно позитивные или негативные сообщения, а не нейтральные [6].

Таблица 1 представляет результаты различных методов машинного обучения на данных датасета SentiRuEval-2015 на основе работы [18]. В 2015 году лучшим результатом по  $F_1$  *macro*, достигнутым участниками тестирования, было значение 48.80 – результат был получен классическим методом машинного обучения – методом опорных векторов SVM, основными признаками в которых были слова сообщения. На второй строчке Таблицы 1 приведены результаты того же классического метода опорных векторов, но который уже использует векторные представления слов, т.е. снижается проблема новых слов, и в результате мы видим рост результатов. Однако метод опорных векторов не создает представления последовательностей слов, всего предложения в целом, и поэтому рост результатов очень небольшой.

Применение рекуррентных нейронных сетей типа LSTM позволило дальше улучшить качество классификации, поскольку такая сеть формирует представление для предложения в целом. Применение двунаправленной сети LSTM (BiLSTM) еще улучшило результаты, что соответствует и результатам в решении многих других задач. Это связано с тем, что в процессе обучения формируется два представления предложения: слева направо и справа налево, что во многих случаях позволяет лучше учесть контекст.

Использование предобученных контекстуализированных векторных представлений дает возможность многоязычной модели mBERT с большим отрывом улучшить качество результатов. Использование специальной модели для русского языка RuBERT позволяет достичь дальнейшего улучшения результатов. Подходы, используемые для анализа тональности на основе BERT, могут быть разделены на две группы: 1) классификация по одному предложению; 2) классификация с использованием вспомогательных предложений, в процессе которой задача анализа тональности преобразуется в задачу классификации пары предложений.



Одним из подходов, основанных на классификации двух предложений, является подход BERT-NLI (natural language inference - вывод по тексту) [18], в котором задача ставится как оценка смысловой близости двух предложений по бинарной шкале (да/нет). На вход такой модели подается два утверждения: одно исходное, а другое вида "Тональность MASK равна ... где на месте троеточия могут стоять слова *позитивная, негативная, нейтральная*. Данная задача рассматривается как классификация на два класса: следует второе предложение из первого или нет. Для обеих применяемых моделей архитектуры BERT такая постановка задачи приводит к улучшению результатов по всем метрикам.

Таблица 1. Исследование подходов машинного обучения на данных тестирования SentiRuEval-2015: тональность сообщений по отношению к мобильным операторам [18]

N	Model	Acc.	$F_1$ macro	$F_1^{+-}$ macro	$F_1^{+-}$ micr
1	SentiRuEval-2015 [6]	–	–	48.80	53.60
2	SVM	62.86	58.29	50.27	54.70
3	CNN	60.80	57.52	49.92	53.23
4	LSTM	64.46	58.94	52.10	56.03
5	BiLSTM	65.54	59.35	53.01	56.83
6	mBERT	72.48	67.04	58.43	62.53
7	RuBERT	76.55	69.12	61.34	66.23
8	mBERT (NLI)	74.66	68.24	59.17	64.13
9	RuBERT(NLI)	76.40	68.83	63.14	67.45
10	RuBERT(NLI)+auto	<b>79.12</b>	<b>71.16</b>	<b>65.71</b>	<b>70.65</b>
11	Manual	–	–	70.30	70.90

## 5. Методы аугментации и автоматической разметки данных в задаче анализа тональности

Размечаемые вручную данные для использования методами машинного обучения всегда ограничены по размеру. В предыдущем разделе было показано, что переход на векторные представления слов и предобучение векторных представлений на больших объемах текстовых данных, позволяют значительно улучшить качество решения задачи анализа тональности. Подходами, которые и дальше могут повышать качество извлечения тональности, являются методы аугментации ручной обучающей коллекции, т.е. размножение исходных размеченных данных с помощью синонимов, перестановок слов и др., а также автоматическая доразметка

(псевдоразметка) дополнительных данных на основе некоторых ресурсов, например, словарей.

Рассмотрим данные подходы на примере работы [19] и их результаты на датасете SentiRuEval-2015. Были предложены следующие методы автоматической разметки обучающей коллекции:

а. В новостном корпусе ищутся положительные (*гений, чемпион, герой*) и отрицательные названия людей (*наглец, мошенник, лжец* и др.) из словаря оценочных слов RuSentiLex [4]. Всего было извлечено 822 негативных названия и 108 позитивных. Предполагается, что контекст такого слова также соответственно положительный или отрицательный, значит соответствующие предложения можно извлечь как позитивные или негативные относительно выделенного слова (так называемая общая коллекция). Например, предложение подается на обучение следующий образом: "MASK - это тот, кто на безвозмездной основе помогает развитию науки и искусства, оказывает им материальную помощь из собственных средств". Поскольку в данном случае замаскировано положительное слово *меценат*, то это предложение считается примером с позитивной тональностью по отношению к сущности MASK.

б. Для более специализированного анализа тональности относительно заданного типа сущностей (например, банков или мобильных операторов) создается дополнительная автоматическая коллекция. В нее включаются предложения, в которых рядом с заданной сущностью находятся только негативные или только позитивные слова из словаря оценочных слов RuSentiLex - так называемая тематическая коллекция, например, "ФАС подозревает MASK в навязывании абонентам платных услуг». Дополнительным условием является отсутствие в предложении отрицаний и других модификаторов тональности.

с. В качестве примеров нейтрального класса использовались предложения, в которых вместе с заданным типом сущностей не найдено известных оценочных слов.

Модель RuBERT была сначала предобучена на общей коллекции, затем на тематической коллекции и затем обучение было продолжено на реальных обучающих данных. Такой подход привел к улучшению результатов классификации сообщений. В Таблице 1 в строке RuBERT(NLI)+auto указаны достигнутые результаты с помощью описанной процедуры для рассматриваемого датасета. Отметим, что в строке Manual приведены результаты разметки тестового множества независимым лингвистом, представленной одним из участников тестирования SentiRuEval-2015. Видно, что результаты метода RuBERT(NLI)+auto практически достигли уровня человеческой разметки по одной из метрик.

## 6. Заключение

В данной работе представлен краткий обзор задач анализа тональности, а также проблем и используемых подходов. В последние годы в задачах анализа тональности активно применяются методы машинного обучения. В статье рассматриваются основные подходы машинного обучения и их особенности. На примере одного из датасетов для русского языка рассмотрен прогресс методов в задаче анализа тональности.

## Благодарности

Данное исследование поддержано грантом РФФИ 20-07-01059.

## References

- [1] Cambria, E., Das, D., Bandyopadhyay, S., Feraco, A., *A practical guide to sentiment analysis*, 2017.
- [2] Liu, B., Zhang, L., “Survey of opinion mining and sentiment analysis”, *Mining text data*, 2012, 415–463.
- [3] Русначенко, Н. Л., “Применение языковых моделей в задаче извлечения оценочных отношений”, *Труды Института системного программирования РАН*, **33**:3 (2021), 199–222.
- [4] Kuznetsova, E., Loukachevitch, N., Chetviorkin, I., “Testing rules for a sentiment analysis system”, *International conference on computational linguistics and intellectual technologies Dialogue-2013*, **2** (2013), 71–80.
- [5] Loukachevitch, N., Levchik, A., “Creating a general Russian sentiment lexicon”, *Proceedings of the Tenth International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC’16)*, 2016, 1171–1176.
- [6] Kiritchenko, S., Zhu, X., Mohammad, S., “Sentiment analysis of short informal texts”, *Journal of Artificial Intelligence Research*, **50** (2014), 723–762.
- [7] Loukachevitch, N., Rubtsova, Y., “Entity-oriented sentiment analysis of tweets: results and problems”, *International Conference on Text, Speech, and Dialogue TSD-2015*, 2015, 551–559.
- [8] Kotelnikov, E., Peskischeva, T., Kotelnikova, A., Razova, E., “A comparative study of publicly available Russian sentiment lexicons”, *Conference on Artificial Intelligence and Natural Language AINL-2018*, 2018, 139–151.
- [9] Loukachevitch, N., Dobrov, B., “RuThes linguistic ontology vs. Russian wordnets”, *Proceedings of Global Wordnet conference GWC-2014*, 2014, 154–162.
- [10] Chetviorkin, I., Loukachevitch, N., “Extraction of Russian sentiment lexicon for product meta-domain”, *Proceedings of COLING 2012*, 2012, 593–610.
- [11] Koltsova, O., Alexeeva, S., Kolcov, S., “An opinion word lexicon and a training dataset for Russian sentiment analysis of social media”, *Computational Linguistics and Intellectual Technologies Dialogue-2016.*, 2016, 277–287.
- [12] Loukachevitch, N., Rusnachenko, N., “Sentiment Frames for Attitude Extraction in Russian”, *Proceedings of the International Conference on Computational Linguistics and Intellectual Technologies Dialogue-2020*, 2020.

- [13] Joshi, A., Bhattacharyya, P., Carman, M., “Automatic sarcasm detection: A survey”, *ACM Computing Surveys (CSUR)*, **50:5** (2017), 1–22.
- [14] Pang, B., Lee, L., Vaithyanathan, S., “Thumbs up? Sentiment Classification using Machine Learning Techniques”, *Proceedings of Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing EMNLP– 2002*, 2002, 79–86.
- [15] Zhang, L., Wang, S., Liu, B., “Deep learning for sentiment analysis: A survey”, *Wiley Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, **8:4** (2018).
- [16] Devlin, J., Chang, Ming-Wei, Lee, K., Toutanova, K., “BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding”, *Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies*, **1** (2019), 4171–4186.
- [17] Kuratov, Y., Arkhipov, M., “Adaptation of deep bidirectional multilingual transformers for russian language”, *International Conference on Computational Linguistics and Intellectual Technologies Dialog-2019*, 2019.
- [18] Tikhomirov, M., Loukachevitch, N., Sirotnina, A., Dobrov, B., “Using bert and augmentation in named entity recognition for cybersecurity domain”, *International Conference on Applications of Natural Language to Information Systems*, 16–24.
- [19] Golubev, A., Loukachevitch, N., “Improving results on Russian sentiment datasets”, *Conference on Artificial Intelligence and Natural Language AINL-2020*, 2020, 109–121.
- [20] Golubev, A., Loukachevitch, N., “Use of Augmentation and Distant Supervision for Sentiment Analysis in Russian”, *International Conference on Text, Speech, and Dialogue TSD-2021*, 2021, 184–196.

## **Automatic sentiment analysis of texts: problems and methods** **Loukachevitch N.V.**

This paper provides a brief overview of the problems of sentiment analysis, as well as the problems and approaches used. In recent years, machine learning methods have been actively used in sentiment analysis problems. The article discusses the main approaches of machine learning and their features. On the example of one of the datasets for the Russian language, the progress of methods in the problem of sentiment analysis is considered.

*Keywords:* sentiment analysis, targeted sentiment analysis, sentiment lexicon, machine learning, neural network, BERT.

## **References**

- [1] Cambria, E., Das, D., Bandyopadhyay, S., Feraco, A., *A practical guide to sentiment analysis*, 2017.
- [2] Liu, B., Zhang, L., “Survey of opinion mining and sentiment analysis”, *Mining text data*, 2012, 415–463.

- [3] Kuznetsova, E., Loukachevitch, N., Chetviorkin, I., “Testing rules for a sentiment analysis system”, *International conference on computational linguistics and intellectual technologies Dialogue-2013*, **2** (2013), 71–80.
- [4] Loukachevitch, N., Levchik, A., “Creating a general Russian sentiment lexicon”, *Proceedings of the Tenth International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC’16)*, 2016, 1171–1176.
- [5] Kiritchenko, S., Zhu, X., Mohammad, S., “Sentiment analysis of short informal texts”, *Journal of Artificial Intelligence Research*, **50** (2014), 723–762.
- [6] Loukachevitch, N., Rubtsova, Y., “Entity-oriented sentiment analysis of tweets: results and problems”, *International Conference on Text, Speech, and Dialogue TSD-2015*, 2015, 551–559.
- [7] Kotelnikov, E., Peskischeva, T., Kotelnikova, A., Razova, E., “A comparative study of publicly available Russian sentiment lexicons”, *Conference on Artificial Intelligence and Natural Language AINL-2018*, 2018, 139–151.
- [8] Loukachevitch, N., Dobrov, B., “RuThes linguistic ontology vs. Russian wordnets”, *Proceedings of Global Wordnet conference GWC-2014*, 2014, 154–162.
- [9] Chetviorkin, I., Loukachevitch, N., “Extraction of Russian sentiment lexicon for product meta-domain”, *Proceedings of COLING 2012*, 2012, 593–610.
- [10] Koltsova, O., Alexeeva, S., Kolcov, S., “An opinion word lexicon and a training dataset for Russian sentiment analysis of social media”, *Computational Linguistics and Intellectual Technologies Dialogue-2016.*, 2016, 277–287.
- [11] Loukachevitch, N., Rusnachenko, N., “Sentiment Frames for Attitude Extraction in Russian”, *Proceedings of the International Conference on Computational Linguistics and Intellectual Technologies Dialogue-2020*, 2020.
- [12] Joshi, A., Bhattacharyya, P., Carman, M., “Automatic sarcasm detection: A survey”, *ACM Computing Surveys (CSUR)*, **50**:5 (2017), 1–22.
- [13] Pang, B., Lee, L., Vaithyanathan, S., “Thumbs up? Sentiment Classification using Machine Learning Techniques”, *Proceedings of Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing EMNLP– 2002*, 2002, 79–86.
- [14] Zhang, L., Wang, S., Liu, B., “Deep learning for sentiment analysis: A survey”, *Wiley Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, **8**:4 (2018).
- [15] Devlin, J., Chang, Ming-Wei, Lee, K., Toutanova, K., “BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding”, *Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies*, **1** (2019), 4171–4186.
- [16] Kuratov, Y., Arkhipov, M., “Adaptation of deep bidirectional multilingual transformers for russian language”, *International Conference on Computational Linguistics and Intellectual Technologies Dialog-2019*, 2019.
- [17] Tikhomirov, M., Loukachevitch, N., Sirotnina, A., Dobrov, B., “Using bert and augmentation in named entity recognition for cybersecurity domain”, *International Conference on Applications of Natural Language to Information Systems*, 16–24.
- [18] Golubev, A., Loukachevitch, N., “Improving results on Russian sentiment datasets”, *Conference on Artificial Intelligence and Natural Language AINL-2020*, 2020, 109–121.
- [19] Golubev, A., Loukachevitch, N., “Use of Augmentation and Distant Supervision for Sentiment Analysis in Russian”, *International Conference on Text, Speech, and Dialogue TSD-2021*, 2021, 184–196.

# Машинное зрение: от задачи до аппаратной реализации

А. В. Шокуров <sup>1 2</sup>

Одно дело решить задачу математически и разработать соответствующий метод, а совсем другое переложить его на аппаратные компоненты. Даже на первый взгляд простые задачи требуют тщательного продумывания архитектуры программного обеспечения аппаратной реализации. Нужно понимать устройство оперативной и внутренней памяти, в том числе, аппаратных механизмов прямого копирования данных из различных подсистем, и функционирование отдельных подсистем (контроллеров) большой системы (система на чипе), а также, их взаимодействие. В частности, учитывать, что вычисления можно выполнять не только на процессоре, а, например, на каком-то контроллере. Так, есть тензорные вычисления, а есть ещё более специализированные по цифровой обработке изображений. Даже действенный вывод графической информации требует внимание от разработчика иначе могут возникнуть артефакты (искажение данных) при их визуализации. Для быстродействия методов важна не только математическая составляющая, но и аппаратная поддержка реализации отдельных частей алгоритма. Последнее находит отражение в современных архитектурах вычислительных систем и встроенных процессоров.

**Ключевые слова:** аппаратная реализация, процессор, оперативная память, контроллеры.

Допустим имеется метод решения некой задачи обладающий важными характеристиками. Замечу, что одно дело его теоретические возможности, а совсем другое показатели на реальном «железе» (компьютер/встроенная система). Последнее влечет важность разработки правильной аппаратной реализации теоретических методов. В данном тезисе делается упор на эффективном использовании аппаратных ресурсов системы, в частности, на скорости работы метода.

---

<sup>1</sup>Шокуров Антон Вячеславович — к.ф.-м.н., научный сотрудник лаборатории вычислительных методов механико-математического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова, e-mail: shokurov.anton.v@yandex.ru

Shokurov Anton Vyacheslavovich — Ph.D., research associate of Computational Methods Laboratory of Mechanics and Mathematics Faculty of Lomonosov Moscow State University

<sup>2</sup>Исследование выполнено при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Мозг, когнитивные системы, искусственный интеллект»

This research has been supported by the Interdisciplinary Scientific and Educational School of Moscow University «Brain, Cognitive Systems, Artificial Intelligence»

# 1. Система сжатие речи

Рассмотрим задачу сжатия речи человека. Будем исходить из того, что существует кодек (реализация метода сжатия) под рассматриваемый процессор (вычислительное ядро). Опишем «железные» детали, которые нужно учесть для успешной его работы в рамках системы. Успешность понимается в смысле эффективного использования ресурсов, в частности, высокой скорости работы кодека.

Наличие кода означает, что есть некая функция, которой можно передать массив аудио данных определенного размера. Функция возвращает закодированные аудио данные в некоем другом массиве. Вызывая данную функцию для последовательных фрагментов аудио потока можно получить закодированные (сжатый) данные. Такой подход имеет простую реализацию на современных CISC процессорах (например, на архитектуре x86 от Intel/AMD) за счет переизбытка ресурсов.

В случае же относительно низкопроизводительных RISC процессоров типа DSP (digital signal processing processor, например, bf60x от Analog Devices или TMS320C6x от Texas Instruments) не все так же просто. Целью использования такого рода систем заключается в экономии денег: зачем платить больше, если можно сделать более дешевое решение, но за счет более продуманной программной архитектуры итоговой системы. Поэтому, естественно, хочется выполнить эффективную реализацию итоговой системы на базе рассматриваемого кодека на оных DSP, которые обычно дешевле эквивалентных CISC систем.

**Отключение кеша** Вычислительное ядро процессора может выставить произвольный адрес (в общем случае, на внешней шине процессора) и тем самым работать с разными типами памяти/устройствами (чипами). Память может быть как внутренняя, так и внешняя, отличающиеся по скорости обработки данных, а точнее по времени необходимом для получения/записи значения ячейки. В момент ожидания данных происходит простой вычислительного ядра, т.е. прекращение выполнения инструкций, что, естественно, снижает его производительность, которая как раз таки существенно важна. Последнее, в частности, происходит при случайном доступе к внешней, например, оперативной памяти.

Для нивелирования данного эффекта обычно используется кэш, являющегося частью процессора. Кэш нужен для ускорения доступа к оперативной памяти, которая как минимум на порядок медленнее. Последнее достигается за счет запоминания значений наиболее часто встречаемых адресов данных. В итоге кэш хорошо подходит для каких-нибудь универсальных методов и, соответствующих, программ, в которых не придется задумываться зачем вообще кэш нужен и даже о самом факте

его существования. Последнее справедливо даже с точки зрения программиста, а не пользователя системы.

Операция поиска адреса была бы очень долгой, если бы кэш был устроен как список актуальных адресов и, соответствующих, значений. Поэтому поступают иначе: по адресу ячейки памяти строится индекс корзинки/набора, которая и содержит обозначенный массив (кэш линий) адресов. Количество элементов в корзинке фиксировано и называется ассоциативностью кеш памяти (обычно 4 или 8). Для эффективной реализации кеша адрес разбивается на разные поля [1]: связка (tag), индекс корзинки (set number) и смещение (offset). Как следствие для каждого используемого адреса достаточно сравнить 4/8 значения (кусоч tag адреса), для чего имеется эффективная реализация в кристалле кеша.

Приведем пример на конкретных числах. Стандартный объем кеша около 32 Кб, что на несколько порядков меньше обычно доступной оперативной памяти (1 гигабайт). Кэш строка состоит обычно из 64 ( $= 2^6$ ) байтов. Тогда количество корзинок равно  $\frac{32KB}{64B} = 512$ , для индексации которых потребуется  $9(2^9 = 512)$  бит в поле адреса. В случае 1 гигабайта ( $= 2^{30}$ ) оперативной памяти потребуется  $30 - 9 - 6 = 15$  бит для связки (taga).

В каждую корзинку можно поместить (запомнить) не более 4/8 адреса с различающимися tagами, в противном случае происходит коллизия. В случае коллизии нужно будет замещать один адрес другим и, соответствующим, значением. Выбор вытесняемой из кэша строки обеспечивается алгоритмом замещения одних кэш строчек в корзинке, на другие. При обычном использовании вычислительной системы для «пользователя» описанные процессы «прозрачны», т.е. кэш живет своей жизнью.

Алгоритм замещения сложный и поэтому в общем случае в ходе данного процесса может произойти неожиданное (сложно прогнозируемое) вытеснение важного адреса из кэша и какой-то критически важный метод (обработка сигнала/события) работает позже, чем необходимо. Последнее может привести к катастрофе (в буквальном смысле, если речь идет например об атомной станции или навигационной системе самолета). Так, из-за некорректной работы кэша могут потребоваться много холостых процессорных тактов пока не загрузятся необходимые данные из оперативной памяти. Если работа системы исходно была аккуратно посчитано с точностью до такта, то это будет означать, что актуальный алгоритм не работает в запланированный момент, что может привести к цепной реакции задержек обработки событий и, в конечном итоге, к сбою системы.

Один из способа нивелирования данной проблемы это использования чрезмерно высокопроизводительного процессора. Но такой процессор видится дороже, по крайней мере дороже чем та система, которая может



быть построена на ручном управлении загрузкой и выгрузкой данных из внутренней памяти процессора.

Хорошо на некоторых системах кэш памяти можно отключить. Что и предлагается сделать в рассматриваемом случае.

**Внутренняя память процессора** При отключении кэша та область памяти, которая им использовалась под хранение временных строчек в корзинках, может быть использована как обычная память. Последнее означает, что по определенному адресному под-пространству процессора станет доступна внутренняя память процессора. Тип внутренней памяти обычно является SRAM (Static RAM), которую не следует путать с DRAM (Dynamic RAM). Внутренняя память работает быстро (на частоте процессора), гораздо быстрее чем оперативная память.

Существенно разное быстродействие типов памяти связано с их разным технологическим производством. Оперативная память (DRAM) состоит из конденсаторов, а внутренняя память процессор (SRAM) построена на базе транзисторов. В итоге внутренняя память работает на несколько порядков быстрее внешней, оперативной. Отмечу, что цена первой существенно дороже второй.

С памятью связано такое понятие как банк. Банк памяти подразумевает возможность независимой работы с разными частями области (чипа) памяти, что позволяет одновременно эффективно читать/писать в разные банки/области памяти. У внутренней памяти несколько банков, обычно как минимум два. При двух банков можно сделать так, чтобы разные процессы взаимодействовали с разными банками. Тогда конфликтов и, соответственно, ожидания освобождения шины при доступе к памяти не будет.

Речь идет о как минимум двух процессах: кодирование/сжатие аудио потока и загрузка данных во внутреннюю память (в нужный банк). Внутренняя память процессора связана отдельной шиной с оперативной памятью. Данные можно копировать процессором, что крайне неэффективно. Теряется весь смысл задуманного, т.е. создание эффективной системе на базе микропроцессора типа DSP. Такты процессора лучше на вычислительные методы использовать. К внутренней памяти процессора имеет доступ не только вычислительное ядро, но и специальный контроллер DMA, который может выполнить необходимое копирование.

**DMA контроллер** Данные во внутреннюю память процессора могут быть скопированы благодаря dma (direct memory access) контролеру процессора. Он выполняет операция копирования данных из «источника» в «пункт назначения» минуя вычислительное ядро процессора. Может взаимодействовать не только с внутренней/внешней памятью, но и другими

«устройствами» процессора. Например, взять данные с аудио устройства (например, с многоканального АЦП) или видео (видео аппаратный кодек) и записать во внешнюю/внутреннюю память.

При копировании данных в память DMA контроллером поддерживает разные режимы обхода по массиву. В частности, может заполнить матрицу построчно для растрового изображения. Может и многоканальные (мультиплексированные) аудио данные (например, аудио) автоматически записать по отдельным строчкам/массивам матрицы фиксированного размера. В последнем случае каждая строка матрицы будет соответствовать определенному аудио каналу многоканального потока.

В итоге, оперативная память нам и не понадобится вовсе. Ведь DMA можно настроить так, чтобы он непосредственно брал данных с аудио устройства и копировал сразу внутрь самого процессора попутно разбивая на отдельные аудио каналы. Далее можно запустить процесс кодирования загруженных аудио данных. Последний будет работать оптимально раз аудио данные находятся во внутренней памяти процессора.

Замечу, что помимо ранее указанных недостатков в случае использования кэша, данные бы к тому же бы и лишней раз копировались. Сначала данные копировались бы в оперативную память, а потом автоматизировано загружались бы в кэш при кодировании. Далее закодированный аудио поток копировался бы в обратную сторону, а именно – из кэша в оперативную память, а потом в сеть или карту памяти. Очевидно лишнее копирование снижает эффективность системы (например, увеличивает задержку по кодированию аудио данных). Рассматриваемый в данном разделе подход сразу позволяет скопировать аудио данных во внутреннюю память процессора.

**Двойная буферизация** Как ранее было указано, эффективная работа не позволяет одновременно использовать один и тот же банк памяти, иначе операции будут друг на друга влиять, например, блокировать операции чтения/записи. Например, могут потеряться записываемые из АЦП аудио данные во внутреннюю память, если в тот же самый момент к этому же банку памяти обращается вычислительное ядро.

Для избежания подобных эффектов предлагается использовать принцип двойной буферизации, в данном случае, необходимо использовать два банка и работать с каждым из банков попеременно и в противофазу.

В случае кодирования аудио потока, пока данные закачиваются с аудио устройства в первый банк, вычислительное ядро тем временем должно работать со вторым банком. И наоборот, пока данные закачиваются во второй банк, вычислительное ядро тем временем работает с первым банком. И так далее. В данном случае, работа вычислительного ядра заключается в кодировании аудио данных. Понятно, что при

кодировании аудио данные будут актуальны так как ранее туда были скопированы.

Всё синхронизируется благодаря четко выбранной грануляции обработки фрагментов аудио данных. Например, в случае 1/8 секунды при 8000 Гц частоте дискретизации и 8 битном режиме будет 1000 байтов на буфер одного канала. Момент переключения на другой банк определяется обработчиком прерывания, который и переинициализирует dma канал (хотя можно включить автоматический режим). При переключении фактически меняются местами указатели на буфера в соответствующих банках. Один из указателей отвечает за то, что должно быть закодировано, а другой – куда скопировать новую порцию аудио данных.

**SIMD инструкции** DSP подразумевает наличие специальных инструкций позволяющих выполнять вычисления быстро. К таким инструкция, в частности, относятся SIMD (Single Instruction Multiple Data), которые позволяют выполнять векторные операции за такт. Например, поэлементно сложить два 4 элементных вектора из 8-битных чисел. Имеются важные операции и для векторного умножения и многих других важных математических действий. Кодек разработан на базе SIMD инструкций, поэтому все необходимые для кодирования/сжатия аудио потока вычисления делаются вычислительным ядром процессора.

При написании кода кодека не учитывалось устройство кэша, dma контроллера и подобных аппаратных сущностей. Требование к эффективному запуску кода заключается в быстром доступе к памяти, а именно – что при загрузке данных в регистры и, соответственно, выгрузки скорость максимальна. Для выполнения данного условия данные должны находиться во внутренней памяти процессора.

Как только многоканальные аудио данные скопированы DMA контроллером во внутреннюю память для каждого из каналов (буфера, массива данных) выполняется их обработка/кодирование аудио кодеком.

**Итоговая система** Одно дело написать метод под инструкции процессора, а совсем другое организовать процессы итоговой системы, которые его реализуют. Данную систему можно описать в виде циклограммы, в которой описано, что в какой момент происходит. Циклограмма пишется с точки зрения тактового генератора процессора.

Получается, что данные непосредственно с аудио устройства попадают во внутреннюю память процессора, одновременно с этим происходит кодирование данных, которые ранее были туда скопированы. Далее происходит переключение этих буферов, массивов данных.

Что можно сделать с теми данными, которые были закодированы? Можно по такому же принципу (применив DMA), например, отослать

их на устройство под названием «сетевая карточка» и транслировать по протоколу rtp. Последнее нужно сделать не дожидаясь смены буферов как только данные будут закодированы. Итого, пока данные копируются в дугой банк для данных текущего банка выполняется кодирование, а далее передача их в сеть. Потом ждем прерывания для смены буфера. В последнем случае ресурсов как таковых у такой системы не будет. Она вечная.

## 2. Специализированные вычислительные блоки

Развитие передовых кодеков идет своей жизнью, но в некоторых ситуациях главный принцип это совместимость, то что он неизменно используется на протяжении десятков лет. Последнее влечет наличие неких эталонных кодеков/методов, более того, они уже достаточно давно различными способами в железе реализуются. Возможно в этом есть какой-то ещё и экономический смысл, ведь чип с аппаратной поддержкой некого метода обычно гораздо дешевле, чем универсальный процессор с программной реализацией того же метода.

Для кодирования видео в рассмотренной ранее схеме можно заменить аудио на видео, аудио кодек на видео - и все будет работать. Но тенденция показывает, что дешевле делать методы в кристалле.

Высокопроизводительные вычисления можно достигать не только инструкциями, но и подсистемами процессора, его специализированными контроллерами. В железе реализуют сжатие изображений, видео и даже вычисления движения (оптический поток/смещения блоков mpeg). Это по сути готовые методы зашитые в процессор и для работы как раз обычно использующие внутреннюю память. Аппаратные реализации конечно имеют большое количество ограничений.

По аналогии с прошлым разделом рассмотрим заявленную идею на примере с кодеком сжатия jpeg.

**Вводные** Метод JPEG можно реализовать на языке Си или даже на ассемблере (например, с использованием инструкциях simd). Учитывая, настолько этот метод сжатия востребован можно сделать иначе – можно переложить реализацию метода в кристалл (контролер процессора).

При сжатии аудио потока данных требуется немного и поэтому можно, как ранее было описано, сразу их загружать во внутреннюю память процессора для кодирования. Но, если мы берем видео кадры, то они на порядок больше памяти занимают и сразу загружать их во внутреннюю память процессора не всегда эффективно (но можно за счет усложнения кода). Поэтому видео кадры будем сначала целиком загружать в оперативную память, а уже потом от туда копировать во внутреннюю.

Опишем внутреннее устройство оперативной памяти.

**Оперативная память DRAM** Когда данных много, в частности, при обработке видео кадров (одна картинка обычно большая и их часто много), без оперативной памяти сложно обойтись. В таком случае первоначально данные загружаются в оперативную память.

Необходимо правильно взаимодействовать с оперативной памятью. Оперативная память работает (относительно) быстро, если действовать по некому правильному «протоколу». Например, если мы будем случайно «прыгать» по адресам в памяти, то скорость будет очень медленной, а если идти по последовательным адресам, то скорость обработки будет фактически оптимальной.

Память DRAM организована как матрица некоего фиксированного размера. С матрицей связаны такие понятия как индекс ряда и колонки. Каждый ряд является страницей памяти, наименьшим адресуемым внутренним кирпичиком чипа DRAM. При считывании произвольного байта, на самом деле внутренним чипом памяти грузится вся страница, которая содержит этот байт, а уже потом из неё выбирается нужный байт (адресом колонки). Думаю понятно, что неэффективно строить запросы к памяти так, что для каждого байта грузиться своя страница памяти. Правильнее загрузив страницу обращаться к байтам этой же страницы как можно чаще. Так, если индекс ряда зафиксирован (постоянен), а меняется только адрес колонки, то данные берутся из уже загруженной страницы памяти.

Описанная схема работы чипа DRAM реализуется следующим образом. Физический адрес (идентифицирующий ячейку памяти) разбивается на какое-то количество битовых полей. В частности, есть битовые поля индекса ряда и колонки. Последнее битовое поле фактически отбрасывается/игнорируется ввиду того, что из оперативной памяти (планки) грузятся сразу несколько байтов, соответствующие кэш строке. Помимо данных полей в физическом адресе можно выделить битовое поле отвечающее за индекс/номер банка.

Банк обеспечивает независимую работу со страницами памяти, например, если 4 банка, то можно одновременно иметь подгруженными 4 страницы памяти и, соответственно, 4 независимых потока данных. Последнее позволяет на высокой скорости копировать из одной части памяти в другую или одновременно копировать что-то в память и что-то другое из памяти. Без банков страницы бы постоянно загружались и выгружались бы, что существенно бы снизило скорость.

**Итоговая система** В случае декодирования видео к памяти будут обращаться как минимум два процесса/контроллера. Один это аппарат-

ный распаковщик jpeg картинок, а другой видео контроллер (отрисовщик кадров). Память не может на такой высокой скорости обрабатывать запросы одновременно. Поэтому необходимо учесть нюансы при работе с банками памяти и гарантировать, что запросы не будут пересекаться. В противном случае, появится «снег» (случайные, обычно белые, точки на экране) – артефакт указывающий на то, что видео контроллер не смог считать значение пикселей из памяти (ввиду занятости шины), поэтому они заменены на случайные значения.

Загрузим видео данные (по одному кадру) непосредственно с камеры в очередной из банков оперативной памяти DRAM. Одновременно с этим копируем из другого банка во внутреннюю память процессора. Далее по аналогии с обработкой аудио данных происходит кодирование загруженных данных, то есть вызываем некую функцию или программируем некие регистры специализированного контроллера процессора указав адрес одного буфера со сжатой картинкой. После распакованную картинку нужно передать (через DMA) видео контроллеру. Далее мы повторяем эти же действия после обмена указателей. При наличии оперативной памяти закодированные данные предварительно можно перед дальнейшей обработкой скопировать обратно в неё, а потом, например, записать их на flash-память, т.е. возможны разные уже варианты в зависимости от цели системы.

Обычно для отмеченных ранее процессов составляют циклограмму. Можно заметить, что ввиду того, что ресурсы фактически не используются, система также будет работать бесконечно так в такт.

### 3. Специализированные инструкции

Тезис начался с того, что есть некий кодек написанный с использованием SIMD. Далее был приведен случай, когда некий кодек реализован в самом процессоре.

В согласии с ранее написанным, процесс удешевления итоговых вычислительных систем подразумевает перенос важных элементов/кирпичиков методов в железо. В данном разделе будет показано, что действительно есть некий промежуточный вариант, есть некие кирпичики.

**Специальный тип данных** Как частный случай к этому относится создание специальных типов данных. Так, для «обычных» численных вычислений необходимо уметь работать с числами с плавающей точкой. Традиционно именно на вычисления с плавающей точкой делался упор во всяких ускорителях (например, Tesla от nVidia). Но учитывая последние тенденции в области искусственного интеллекта появилась аппарат-

ная поддержка новых типов данных [4]: как 8/4 битные целые числа, так и 16 битные плавающие точка (в которой поля под мантиссу и порядок выбраны особым образом).

Актуальна задача портирования искусственных нейронных сетей на низкопроизводительное железо. Последнее достигается, например, квантованием – использование меньшего количества битов для представления значений весов [6] в нейронных сетях. Благодаря чему, нейронные сети можно строить с использованием целых чисел, а не чисел с плавающей точкой. Последнее позволяет существенно повысить как скорость их обучения, так и предсказания. Учитывая относительную простоту устройства отмеченных вычислительных блоков их можно сделать в достаточном большом количестве в кристалле (процессоре).

**Растреризация** Наверное, одно из первых значимых примеров аппаратного ускорения связано с отображением трехмерной графики. Традиционный способ отрисовки трехмерных объектов заключается в растреризации (попиксельный проход точек) отдельных треугольников его составляющих. Следовательно необходимо уметь выполнять быструю растреризацию треугольников с учетом перспективной проекции. Алгоритм достаточно прост и легко поддается распараллеливанию и реализации с использованием SIMD [8].

Казалось бы есть алгоритм растреризации треугольников, который можно и распараллелить. Почему бы не ограничиться версиями реализации для GPU (graphics processing unit) [9]? Тем не менее даже в самых современных графических карточках есть отдельный кусок кристалла, который отвечает за растреризацию. Потому что считается, что данная специализация задачи важна и не надо все делать универсальным и переносить на GPU. Традиционно последнее позволило существенно увеличить скорость отрисовки кадров трехмерной сцены в сравнении с процессорной реализацией.

Отмечу, что именно трехмерная графика явилась предтечей современных многоядерных графических карточек с поддержкой вычислений общего назначения. Первоначально были реализованы пиксельные и вершинные шейдеры, позволяющие запустить очень короткий кусок кода (порядка 3 инструкций) для каждого, соответственно, пикселя экранного изображения и вершины полигона для достижения определенных визуальных эффектов. Потом, в результате применения этих сущностей не по назначению удалось одно из важнейших универсальных вычислений перенести на них, а именно – Фурье преобразование [7].

Отрисовка отдельных линий является ещё одним специфическим алгоритмом, кирпичиком. Известный алгоритм Брезенхема [5] использует только целые числа, что позволяет ему иметь хорошие оценки по скоро-

сти работы. Тем не менее, отрисовка линий, тем более, с учетом антиа-лайнинга хороший кандидат на аппаратную поддержку. Такую поддержку имеют видео карточки предназначенные для дизайнеров (например, quadro от компании nVidia). В обычных карточках, которые покупаются, в частности, для игр, не имеется соответствующей аппаратной поддержки.

**Трассировка лучей** В современных графических карточках добавлена поддержка и для ray tracing (трассировка лучей) являющимся другим, более точным подходом отрисовки трехмерной графики. Аппаратно ускорено вычисление в какой именно треугольник попадает заданный луч.

Если рассмотреть данный алгоритм, то поймем, что он плохо параллелизуется ввиду того, что появляются неизбежные условные конструкции [10].

Суть [11] аппаратной реализации алгоритма основана на вложенных коробках (bounding box). Если луч пересекает коробку, то надо рекурсивно обработать его составляющие (внутренние) коробки, а если луч проходит мимо, то эту коробку прекращаем обрабатывать, Листовая коробка будет содержать треугольник. Данный алгоритм аппаратно реализован на графической карточке по причине оптимизации железа, в частности, её цены (не рационально использовать другие ресурсы для реализации трассировки лучей).

**Цифровая обработка изображений** Если возвращаться к специализированным процессорам (ADSP-BF60x[2] компании Analog Devices и TDA2Px[3] компании Texas Instruments), то там уже достаточно давно (с 2010 годов), появились вычислительные блоки или аппаратная поддержка для традиционных методов цифровой обработки изображений. Например блок, который позволяют выполнить свёртку с произвольным ядром 5 на 5, вычисление угла и величины градиента по производным вдоль двух направлений, вычисление гистограммы и так далее. Все вычисления делаются отдельным контроллером, а не основным вычислительным ядром процессора.

Например, у BF60x на аппаратном уровне строится вычислительный граф из подобных операций. Имеет ограничения, например, фиксированное количество узлов и порядок их следования. Например блок, который по значениям градиента вычисляет дискретный угол (16 направлений) и магнитуду. Так, на вход подаются изображение градиентов (по x и y направлениям), на выходе выдается изображение соответствующих углов. Аналогично вычисление интегрального изображения, которые важны при вычислении суммы значений прямоугольного фрагмента изоб-



ражения. Они тоже могут быть вычислены на аппаратном уровне. Итого, соединив блоки соответствующим образом можно построить и гистограмму градиентов.

**Морфологические операторы** Из традиционных методов цифровой обработки изображений есть еще тема морфологических операторов. Позволяет решать ряд важных задач по цифровой обработке изображений: убрать шум соль-перец или подсчитать количество дырок/зерен. Морфологические операторы имеют простую аппаратную реализацию, например, через LUT (look up table). Их аналог основанный на чисто программном варианте был бы гораздо сложнее.

Метод поиска связанных компонент на бинарном изображении каждую из связанных компонент заполнения её порядковым номером. Данный алгоритм имеет аппаратную реализацию, но с ограничением (например, 10 или 20) на количество объектов. Количество предполагаемых объектов на изображении фиксируется в момент создания чипа.

Подсчет объектов в бинарном изображении достигается за счет метода поиска связанных компонент. Но, как было пояснено выше аппаратная реализация не может найти динамическое количество связанных компонент на картинке. Если у нас картинка с шумом соль-перец, то количество связанных компонент будет явно больше пары десятков. Поэтому аппаратная реализация казалось бы будет неприменима. Более того, даже программная реализация, заключающиеся в запоминании координат всех связанных областей и их площадей и поиска среди них только самых больших, потребовало бы большие ресурсы (в частности, памяти).

Морфологические операторы являются грамотным подходом к устранению шума. Воспользуемся морфологическим оператором, который уберет все эти шумовые точки. Его суть заключается в том, что беретсядвигающиеся окошко 3 на 3 по изображению и, если в нем ненулевой является только точка в середине, то она и удаляется/зануляется. Для данного оператора тоже имеется аппаратная реализация.

После чистки изображения от шума можно запустить аппаратную реализованный алгоритм поиска связанных компонент и тем самым решить первоначально поставленную задачу.

С точки зрения морфологических операторов есть ещё интересный пример. Рассмотренные ранее морфологические операторы имели размер 3 на 3, но есть более сложные преобразования, которые вычисляют скелетонизацию (средняя линия внутренней области) связанной компоненты. В данном случае нужно будет либо применить блоки размера 5 на 5, либо пройти по изображению два раза боком размера 3 на 3 (по-

требуется условная операция). Последнее тоже возможно реализовать в железе.

**Постепенный перенос в кристалле** Как показывают приведенные примеры есть тенденция постепенного переноса в кристалл устоявшихся методов. На самом деле такое дело давно наблюдается. Так, в одном из реализаций x86 процессора, была инструкция по вычислению матричного произведения.

## 4. Поиск фитофторы

Продолжая ход мысли предыдущих разделов можно пойти дальше реализации всего метода в кристалле процессора и упростить решение за счет аналоговой части целевой системы. Последнее означает, что некоторые простые алгоритмы можно решить за счет физической предобработки сигнала, например, аналоговым фильтром.

Рассмотрим прикладную задачу из темы искусственного интеллекта. Фитофтора является заболеванием паслёновых культур проявляющиеся на листьях. Задача заключается в выявлении данного заболевания у растений по аэрофотосъемке. Причем, с точки зрения бизнеса необходимо отловить момент заражения, а не когда уже и невооруженным глазом человека будет явно заметны проявления болезни (характерные темные пятна).

**Выбранный подход решения задачи** Видимому (человеку) свету соответствует диапазон длин волн 300нм-700нм, что в свою очередь соответствует спектру солнца. Отражаясь спектральная кривая принимает изменения характерные поверхности и излучателя, т.е. для каждой длины волны можно измерить излучаемую энергию объекта (за вычетом источника освещения). Последнее влечет, что объекты можно попробовать отличать по их спектральным кривым. Эти кривые могут быть использованы не только для классификации самих объектов, но и определения тех или иных характеристик. Например, сорт, урожайность, болезни сельскохозяйственных культур.

Измерения спектра в точке осуществляется спектрометром. Для получения же изображения каждый пиксель которого это спектр применяют гиперспектральную камеру. При гиперспектральной съемке формируются два изображения: непосредственно гиперспектральное и панхроматическое. Разрешение первого изображения обычно небольшое, например, 64 на 64 пикселя, но зато каждый пикселе есть спектр из, например, 100 длин волн. Такое небольшое изображение не позволяет в полной мере

распознавать объекты в традиционном смысле. Для таких целей камерой и создается одновременно с гиперспектральным панхроматическое изображение. Оно имеет размер, например, 1000 на 1000 пикселей, но значение каждого из которых по сути является суммарной энергией всего рассматриваемого спектрального диапазона.

Нашей целью будет найти спектральный поддиапазон, который выявит наличие фитофторы за счет пороговой функции, которая лежит в основе методов распознавания. Даже в нейронных сетях она используется, называясь функцией активации. Отмечу, что нейронные сети не понадобятся для решения поставленной задачи.

**Важность сглаживания изображений** Рассмотрим изображение состоящее из двух объектов (для определенности, кругов), каждый из которых состоит из разной плотности облаков пикселей. Тогда, при одинаковой интенсивности значений пикселей пороговой функцией не получится эти два объекта отделить друг от друга.

Решение данной задачи заключается в сглаживании изображения неким цифровым фильтром, например, выполнив усреднение блоком размера 5 на 5. Действительно, плотность расположения пикселей у объектов разная, поэтому, после сглаживания результирующая интенсивность пикселей этих объектов станет разной. Следовательно, после сглаживания можно применить пороговую функцию, где значение порога выбирается на основе гистограммы интенсивностей пикселей.

Панхроматическое изображение фактически является полутоновым. Разницы в интенсивности между пикселями здорового и больного растения в ходе исследования не выявлено. Но было замечено, что применив сглаживание пороговая функция позволит выделить фрагменты изображения с зараженными растениями. Раз панхроматическое изображение это сумма всего спектра, то может быть поддиапазон спектра, который даст более точный результат? Суть ранее обозначенного простого метода заключается в поиске именно этого значимого поддиапазона спектра. Поддиапазон будет искажаться на спектрах гиперспектрального изображения.

**Поиск спектрального поддиапазона** Сформируем два класса: спектры зараженных растений и здоровых. Необходимо найти спектральный поддиапазон, который позволит лучше всего отделить эти два класса.

Для произвольного спектрального диапазона оптимальный порог ищется за линейное время. Действительно, при выборе спектрального диапазона набор спектров превращается в набор чисел. Для классифи-

кации набора чисел применяется как раз-таки пороговая функция, где оптимальное значение порога ищется по гистограмме.

Поиск же интересующего нас значимого спектрального поддиапазона осуществляется полным перебором. Так, перебираются все возможные поддиапазоны спектра и для каждого из них осуществляется описанная выше процедура поиска оптимального порога и, соответственно, оценка качества классификации. Повторюсь, тут нет нейронных сетей, деревьев и подобных методов машинного обучения.

Для рассматриваемых в рамках этой задачи конкретных данных найденным значимым спектральным диапазоном является диапазон длин волн от 760 до 770 нанометров. Именно он позволяет выявить растения с фитофторой.

**Итоговая система** Выполнив исследование по обнаружению растений зараженных фитофторой по гиперспектральным изображениям был найден значимый спектральный поддиапазон. Если вопрос цены не стоит, то видится следующая итоговая система. Для съемок применить гиперспектральную камеру (они стоят дорого), а для подсчета интегральной суммы поддиапазона спектров использовать высокопроизводительный компьютер, который скорее всего и дорогой. В итоге получится дорогое решение.

Построение дешевой системы сводится к поиску «простого» решения по получению самих значений энергий длин волн из значимого спектрального поддиапазона и их суммирование. Простое аналоговое решение заключается в применении светофильтров. Можно изготовить датчик со спектральными характеристиками соответствующими требуемым спектральным диапазонам. По сути нужно взять «стандартный» датчик и покрыть его необходимыми светофильтрами. Тогда такой датчик будет воспринимать свет только в данных спектральных поддиапазонах. При этом, считанное значение с датчика и будет искомой суммой энергии рассматриваемого спектрального диапазона. В итоге получаем простое решение, которое не требует дорогой камеры и вычислительной системы.

В случае единственного спектрального поддиапазона прикреплять светофильтр (из-за одного фильтра) к датчику наверное не стоит. Можно прикрепить светофильтр к объективу монохромной камеры, что ещё более удешевит итоговую систему.

## 5. Компьютерная графика

В данном разделе будет описаны некоторые методы компьютерной графики в разрезе тех идей, которые были до этого изложены. В основе

большинства представленных в данном разделе методов лежит очень сильная, но в тоже время, простая инженерная мысль.

**Отрисовка графических объектов** Для вывода текста на экран его можно было бы растеризовать в некий (видео) буфер и уже его выводить целиком. При растеризации отрисовывается каждый пиксель по отдельности. Такой подход крайне расточителен как с точки зрения памяти, так и вычислительных ресурсов. Так, фактически многократно выполняются повторные действия при отрисовки одних и тех же букв. С другой стороны, растры отрисованных букв повторяются, что фактически показывает и неэффективное использование памяти. Последнее важно в низкопроизводительных системах или древних/старых компьютерах.

Существенное уменьшение ресурсов достигается за счет хранения выводимого текста в матрице. При выводе на экран графическое ядро вычисляет элемент матрицы накрывающий экранный элемент. Элементу матрицы соответствует некий растр буквы, который хранится отдельно от выводимой информации на экран. Зная элемент матрицы можно экранный элемент сопоставить пикселю растра буквы. Вычисленное значение пикселя и выводится на экране в рассматриваемом элементе. Такой подход и память потребляет существенно меньше, да и растры букв получаются не надо каждый раз отрисовывать (например, через кривые Безье) заново.

Аналогично выводятся на экран спрайты – небольшие по размеру растры. Разница, во-первых, заключается в возможности вывода спрайта в произвольной точке экрана, а не в узлах фиксированной сетки как при выводе текста. Во-вторых, спрайты цветные, а не черные белые буквы. Вывод спрайтов на экран производится поверх основного видео буфера. Подчеркну, вывод спрайтов на экран осуществляется на аппаратном уровне, без лишнего копирования данных. Так, при проходе экранных элементов графическим контролером происходит проверка того в какие спрайты рассматриваемый элемент попадает. На экран выводится значение цвета пикселя того спрайта в которого попали, иначе пиксель видео буфера. Спрайт отрисовывается без копирования, а в процессе показа на экране.

**Отображение окон** Пусть нужно перемещать по изображению высокого разрешения некое окно, которое отображает подобласть/кроп. В современном подходе нужно фактически копировать это кроп (область памяти) в видео кадре на что уходит немалые ресурсы системы. На самом деле все просто при правильном аппаратном решении. Так, достаточно переместить указатель на начало новой отображаемой области. Графическая система будет выводить пиксели экрана относительно нового ука-

зателя. Таким образом при перемещении окна перемещается всего-лишь указатель.

На процессорах с поддержкой аппаратного вывода окошек копировать ничего не потребуется. Подобные технологии есть в DSP системах, в частности, в сотовых (смарт) телефонах и мультимедиа проигрывателях. В них графическая система более эффективна, чем на обычном компьютере. Например, благодаря тем возможностям, которые есть у графического контроллера таких процессоров, можно поверх какого-то окошка (например, поверх видео) отобразить окошко с текстом, в частности, титры.

Нужно будет сделать необходимые аппаратные окошки, которых конечно же поддерживается фиксированное количество, например, не больше 4. Системе нужно будет указать, что первое окошко будет во весь экран в котором показывается видео. Видео (набор jpeg) декодируется в некий буфер в родном для видео цветовом пространстве. Разумеется изображение не нужно переводить в формат rgb (цветной), оно остается в родном формате, например, 410uyv (яркость и цветность с пространственным прореживанием). Далее поверх данного создается окно в текстовом режиме. Для этого указывается координаты лево-верхнего угла и размер, а также и прозрачность. Под словами создается подразумевается, что программируются соответствующие регистры графической подсистемы. Для показа титров достаточно будет обновить текст в текстовом поле (в некоем участке памяти). При выводе на экран графическое ядро корректно совместит описанные окна, в частности, титры будут отображаться поверх видео на лету без копирования. Никакого рендеринга в отдельный участок памяти не происходит. Последнее означает, что такой системой меньше ресурсов тратятся.

На обычном компьютере титры придется постоянно копировать вручную/либо графической системой. В итоге тратятся ресурс процессора. В универсальных системах есть что-то близкое в виде поддержки единственного окна через overlay, но по функционалу оно далеко от выше написанной системы во встраиваемых системах.

**Современная ресурсоемкая архитектура** В современных системах, где есть некий общий буфер, необходимо копировать в него данные для вывода информации на экран. Так есть некий участок памяти, который обрабатывает графическая карточка, точнее выводит его на монитор. Для вывода информации необходимо записать туда информацию, что подразумевает израсходование дополнительных ресурсов системы.

Для некоторых задач компьютерной графики на самом деле есть какие-то простые алгоритмы, но они либо забываются, либо отбрасываются в пользу универсальности. Как мне кажется это одна из при-

чин повышения производительности процессора. Встроенные системы, например, сотовые телефоны видятся более продуманными.

## 6. Итого

Для решения прикладных задач необязательно стремиться к последним тенденция и использовать мощные методы. Иной раз достаточно применить и традиционный подход. Но даже выбрав правильное «простое» решение нужно суметь его эффективно реализовать в железе. В противном случае, система будет работать на порядок, а то и порядки медленнее.

## Список литературы

- [1] Ulrich Drepper, “What Every Programmer Should Know About Memory”, *Red Hat, Inc.*, 2017.
- [2] “Data Sheet Final - ADSP-BF606/ADSP-BF607/ADSP-BF608/ADSP-BF609 Blackfin Dual Core Embedded Processor Data Sheet, Revision A”, *Analog Devices, Inc.*, 2014.
- [3] “TDA2Px SoC for Advanced Driver Assistance Systems (ADAS)”, *Texas Instruments*, 2020.
- [4] “NVIDIA Ampere GA102 GPU Architecture”, *NVIDIA*, 2021.
- [5] Bresenham, J. E., “Algorithm for computer control of a digital plotter”, *IBM Systems Journal*, 1965, № 4(1), 25-30.
- [6] Matthieu Courbariaux, Jean-Pierre David, Yoshua Bengio, “Training Deep Neural Networks with Low Precision Multiplications”, *ICLR*, 2015 (Workshop).
- [7] Kenneth Moreland, Edward Angel, “The FFT on a GPU”, *Conference: Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS Workshop on Graphics Hardware*, 2003.
- [8] V. F. Frolov, V. A. Galaktionov, B. H. Barladyan, “Comparative study of high performance software rasterization techniques”, *Mathematica Montisnigri*, 2020.
- [9] S. Laine, T. Karras, “High-performance software rasterization on gpus”, *ACM*, 2011.

- [10] Timo Aila, Samuli Laine, “Understanding the Efficiency of Ray Traversal on GPUs”, *Conference: Proceedings of the ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS Conference on High Performance Graphics*, 2009.
- [11] Johannes Gunther, Stefan Popov, Hans-Peter Seidel, Philipp Slusallek, “Realtime Ray Tracing on GPU with BVH-based Packet Traversal”, *IEEE/Eurographics Symposium on Interactive Ray Tracing*, 2007.

## **Embedded vision: from objective to hardware implementation** **Shokurov A. V.**

It’s one thing to solve a problem mathematically and develop an appropriate method, but it’s quite another to port it to hardware components. Even seemingly simple tasks require careful thought software architecture hardware implementation. It is necessary to understand the device of RAM and internal memory, including hardware mechanisms for direct copying of data from various subsystems, and the functioning of individual subsystems (controllers) of a large system (system on a chip), as well as their interaction. It is necessary to understand the structure of RAM and internal memory, including hardware mechanisms of direct data copying from various subsystems, and functioning of individual subsystems (controllers) of a large system (system on a chip), as well as their interaction. In particular, take into account that calculations can be performed not only on the processor, but, for example, on some controller. So, there are tensor calculations, and there are even more specialized digital image processing based. Even the effective output of graphic information requires attention from the developer, otherwise artifacts (data distortion) may occur during their visualization. For the performance of methods, not only is the mathematical factor important, but also the hardware implementation support of separate algorithm elements. The latter is reflected in modern computing systems and embedded processors architectures.

*Keywords:* hardware implementation, processor, random access memory, controller.

## **References**

- [1] Ulrich Drepper, “What Every Programmer Should Know About Memory”, *Red Hat, Inc.*, 2017.
- [2] “Data Sheet Final - ADSP-BF606/ADSP-BF607/ADSP-BF608/ADSP-BF609 Blackfin Dual Core Embedded Processor Data Sheet, Revision A”, *Analog Devices, Inc.*, 2014.



- [3] “TDA2Px SoC for Advanced Driver Assistance Systems (ADAS)”, *Texas Instruments*, 2020.
- [4] “NVIDIA Ampere GA102 GPU Architecture”, *NVIDIA*, 2021.
- [5] Bresenham, J. E., “Algorithm for computer control of a digital plotter”, *IBM Systems Journal*, 1965, №4(1), 25-30.
- [6] Matthieu Courbariaux, Jean-Pierre David, Yoshua Bengio, “Training Deep Neural Networks with Low Precision Multiplications”, *ICLR*, 2015 (Workshop).
- [7] Kenneth Moreland, Edward Angel, “The FFT on a GPU”, *Conference: Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS Workshop on Graphics Hardware*, 2003.
- [8] V. F. Frolov, V. A. Galaktionov, B. H. Barladyan, “Comparative study of high performance software rasterization techniques”, *Mathematica Montisnigri*, 2020.
- [9] S. Laine, T. Karras, “High-performance software rasterization on gpus”, *ACM*, 2011.
- [10] Timo Aila, Samuli Laine, “Understanding the Efficiency of Ray Traversal on GPUs”, *Conference: Proceedings of the ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS Conference on High Performance Graphics*, 2009.
- [11] Johannes Gunther, Stefan Popov, Hans-Peter Seidel, Philipp Slusallek, “Realtime Ray Tracing on GPU with BVH-based Packet Traversal”, *IEEE/Eurographics Symposium on Interactive Ray Tracing*, 2007.

# Новые архитектуры сильного ИИ, основанные на принципах работы мозга

С. А. Шумский<sup>1</sup>

Показано, как в ходе биологической эволюции мозг постепенно сформировал иерархическую архитектуру глубокого обучения с подкреплением. Основываясь на этой архитектуре предложена действующая модель сильного ИИ – ADAM, способная обучаться все более сложным поведенческим навыкам по мере увеличения глубины иерархии управляющих уровней.

**Ключевые слова:** общий искусственный интеллект, глубокое обучение с подкреплением, иерархическая система управления.

## 1. Введение

Представляется логичным при создании будущего сильного ИИ «учиться у мозга», поскольку никакой другой системы, обладающей сильным интеллектом, мы не знаем. При этом, разработчиков ИИ должны интересовать не тонкости работы и взаимодействия отдельных нейронов, а способы обучения и взаимодействия друг с другом больших подсистем мозга — не физика мозга, а его схемотехника. Чтобы создать искусственную психику роботов надо подняться от современного уровня отдельных подсистем (глубоких нейросетей) на системный уровень.

## 2. Постановка задачи

Мы будем рассматривать интеллект, как непрременный атрибут автономных агентов. Действительно, когда говорят о человеческом интеллекте, под этим обычно подразумевается некая творческая личность. Творческая — означает способность решать нестандартные задачи, с которыми она раньше не сталкивалась. А личность — означает автономность. Личность не просто исполняет чужие команды, а самостоятельно определяет свое поведение, ставит себе задачи, повинуюсь своим внутренним мотивам, максимизируя свою внутреннюю функцию ценности.

---

<sup>1</sup>*Шумский Сергей Александрович* — к.ф.-м.н., директор по системам сильного искусственного интеллекта Центра компетенций НТИ Искусственный интеллект при МФТИ, руководитель лаборатории когнитивных архитектур ЦНТИ МФТИ, e-mail: serge.shumsky@gmail.com.

Shumsky Sergej — PhD, director for AGI systems, NTI Centre of competence Artificial Intelligence, MIPT, head of laboratory for cognitive architectures, e-mail: serge.shumsky@gmail.com.

Для создания сильного ИИ необходимо создать искусственную творческую личность, которой мы могли бы управлять не напрямую, а через формирование у нее соответствующих ценностей — чтобы интеллектуальный агент мог сам ставить и достигать различные цели, действуя при этом в наших интересах. Так же как мы воспитываем человеческие личности с принятыми в нашем обществе ценностями. В итоге мы должны получить агентский интеллект, обладающий свободой воли. При этом сила такого агентского интеллекта определяется его способностью достигать достаточно сложные и далекие цели, состоящие из многих этапов, т.е. его способностью к долгосрочному планированию своего поведения.

Математическим выражением всех этих требований является т.н. *обучение с подкреплением*, где целью обучения агентов при их взаимодействии с миром является стремление максимизировать поток ожидаемых будущих наград. Для этого он в процессе обучения строит свою модель функции ценности сенсомоторной информации  $Q(s, a)$ , стремясь, чтобы она статистически приближала суммарные будущие награды на некотором временном горизонте, регулируемым параметром дисконтирования будущего  $\gamma$ . Чем ближе  $\gamma$  к 1, тем больше горизонт планирования поведения агента, тем он дальновиднее и «умнее».

Таким образом, задачу построения сильного ИИ можно сформулировать, как умение обучаться достигать отдаленные цели с минимальным числом ошибок (поскольку каждая ошибка имеет свою цену).

### 3. Эволюция мозга

Рассмотрим теперь, как эта задача решалась мозгом позвоночных по мере его эволюции от рыб до человека. У всех позвоночных нервная система имеет один и тот же генеральный план иерархического управления поведением. Нижние этажи с наиболее простыми примитивами движений находятся в спинном мозге. Более сложные поведенческие инстинкты находятся выше по уровням иерархии. Нас будет интересовать верхний этаж управления в *переднем мозге*, где принимаются окончательные решения о том, что делать в той или иной ситуации, где, так сказать, находится свободная воля.

Передний мозг состоит из *коры* (или *паллиума*) и церебральных ядер — *базальных ганглий* (БГ). Последние представляют собой главную тормозную систему мозга, и все сигналы от коры к нижним уровням иерархии проходят через внешнее и внутреннее ядра БГ в одно или два касания. В зависимости от этого какие-то сигналы тормозятся, а какие-то наоборот — растормаживаются. Таким образом, БГ являются главной инстанцией, принимающей решения, и именно во внешнем ядре БГ (*стриатуме*) и формируется функция ценности.

Очень важная обратная связь между БГ и корой через таламус образовалась при выходе животных на сушу у древних пресмыкающихся — динозавров, что позволило им и их потомкам мыслить не отдельными действиями, а вырабатывать согласованные цепочки действий. Благодаря этому динозавры могли преследовать свою добычу даже после того, как она исчезала из виду, поскольку их поведение определялись ожиданием будущих наград на некотором временном горизонте.

Оказывается, что схемотехника БГ с подкрепляющими сигналами из допаминовой системы среднего мозга реализует итерационное обучение функции ценности, используя методы динамического программирования [1], что не требует построения дополнительных предиктивных моделей (т.н. model-free learning):

$$Q(s, a) = \left\langle \sum_{t \geq 0} \gamma^t r(t) \right\rangle_{\pi} = \langle r + \gamma Q(s', a') \rangle_{\pi}$$

$$\Delta Q(s, a) = \alpha (r + \gamma Q(s', a') - Q(s, a)), \quad (\alpha \ll 1)$$

Однако такой дизайн мозга обладал очень важным недостатком — очень ограниченным горизонтом планирования. Оказывается, что при model-free обучении число итераций растет как куб горизонта планирования [2]. Т.е. при горизонте планирования 100 когнитивных актов (около минуты в реальном мире), требуется порядка миллиона прохождений через каждое из состояний поведенческого репертуара! Таким образом, интеллект динозавров, их способность заглядывать в будущее, был принципиально ограничен несколькими десятками когнитивных актов.

Выход из положения со временем нашли сменившие динозавров млекопитающие и птицы. Он состоял в том, чтобы отдельно от функции ценности в стриатуме обучать еще и модель мира в коре (у птиц — в паллиуме), которую можно использовать в качестве тренажера — эмулятора реальности для обучения функции ценности в режиме офлайн [3]. Точность модели мира не зависит от горизонта планирования, так что построение модели мира оказывается существенно более простой задачей, чем обучение поведению.

Кора у млекопитающих первоначально представляла собой эпизодическую память *архикортекса* — гиппокампа и энторинальной коры. Известно, что во сне и наяву во время отдыха животные, включая людей, проигрывают в уме различные эпизоды пережитого за день, тренируя тем самым свою модель поведения.

Эпизодическая память архикортекса со временем была дополнена гораздо более емкой категориальной памятью *неокортекса*, способной к обобщению, выделению типовых категорий, на которых и основывается наша картина мира. В неокортексе также имеется специальная система

обучения модели поведения, когда мозг не занят решением конкретных задач. Это т.н. *дефолтная система*, которая мысленно проигрывает различные воображаемые ситуации, тренируя модель поведения. Возможно это и есть самый древний способ использования мозгом способности неокортекса генерировать новые ситуации взаимодействия с реальным миром.

Простейшая модель неокортекса — *самоорганизующиеся карты признаков* — представляет собой двумерную нейросеть со взаимной конкуренцией между ее элементами [4]. Действительно, как экспериментально показал Маунтклас [5], неокортекс состоит из кортикальных колонок, каждая из которых является детектором определенного признака. Типичная колонка содержит порядка  $10^4$  нейронов, и ее размер определяется разбросом дендритов пирамидальных нейронов коры — около 300 мкм. Эти колонки объединены в более крупные модули — гиперколонок, размер которых определяется длиной аксонов тех же пирамидальных нейронов — около 1 мм. Внутри гиперколонок все колонки конкурируют друг с другом, т.е. тормозят активность соседей, в результате чего победителем в гиперколонке всегда оказывается какая-то одна колонка, наиболее сильно откликающаяся на данный внешний сигнал. Колонки, таким образом, формируют прототипы, т.е. *категории* сигналов и различают к какой категории принадлежит входящий сигнал. Поэтому кора является хранителем всех наших знаний о внешнем мире, выраженных на языке категорий, объединяющих сходные по каким-то признакам объекты.

Важно, что размер гиперколонок невелик — они объединяют порядка нескольких десятков колонок (число букв в типичных алфавитах порядка 30). Значит гиперколонок могут различать не так много признаков, т.е. выделяемые ими категории очень общие. Одна гиперколонка не способна, например, определить лицо человека. Однако несколько гиперколонок могут. Так,  $k$  гиперколонок, содержащих каждая по  $N$  колонок, могут распознать  $N^k$  образов, если они разбивают входные сигналы по разным признакам, т.е. работают с разными подпространствами входного сигнала.

Таким образом, небольшая область из нескольких гиперколонок, размером с горошину, может распознавать десятки тысяч образов любой природы. Например, в височной доле у нас есть небольшая зона примерно такого размера, отвечающая за распознавание лиц. При этом, процесс распознавания лиц в ней можно сопоставить составлению фоторобота путем комбинации небольшого числа типовых элементов лица. И таких модулей размером порядка  $0.1 \text{ см}^2$  в человеческом мозге может быть порядка десятка тысяч.

Мы знаем, что наша кора умеет распознавать не только пространственные, но и временные образы, т.е. последовательности признаков, например, слова или мелодии, т.е. последовательности букв или нот. Эту задачу могут выполнять гипотетические рекурсивные модули, в которых гиперколонку, распознающую входные символы, окружают гиперколонки с локальными связями, «смотрящие» на нее и друг на друга. Такие модули способны преобразовывать временную последовательность символов в пространственный паттерн активности, причем модуль из  $k$  гиперколонок способен запоминать  $N^k$  последовательностей длины  $k$ .

Можно предположить, что именно преобладание таких рекурсивных модулей, т.е. специализация на работе с последовательностями, отличает мозг приматов от мозга остальных млекопитающих. Действительно, как выяснилось относительно недавно [6], у приматов количество нейронов в неокортексе растет пропорционально массе неокортекса (видимо, благодаря преобладанию локальных связей в рекурсивных модулях). Тогда как у остальных млекопитающих в коре преобладают длинные связи, поскольку число нейронов растет как масса неокортекса в степени  $2/3$ . Поэтому с ростом массы коры приматы «умнеют» гораздо быстрее остальных млекопитающих. Так что уникален не сам по себе человеческий мозг, а мозг всех приматов. Люди же просто воспользовались этим преимуществом, максимально нарастив массу мозга (за счет уменьшения массы кишечника, видимо, в связи с освоением огня и переходом на вареную пищу).

Увеличение размера коры и умение работать с последовательностями позволило приматам использовать кору не только для обучения БГ в режиме офлайн, но и для планирования поведения в режиме онлайн. В результате кора высших приматов — и особенно человека — научилась «держаться мыслью», т.е. не просто грезить, а сознательно просчитывать варианты развития событий и сравнивать их между собой, запоминая по ходу дела результаты различных вариантов — используя механизм *рабочей памяти*. Сформировалась новая *центральная исполнительная система* планирования достижения целей в «виртуальной реальности» нашей модели мира.

Причем, что важно, планирование в нашем мозге происходит иерархически — сначала вырабатывается крупномасштабный замысел, который затем прорабатывается и воплощается в жизнь, адаптируясь к ситуации по мере развития событий. Соответственно, у нас в мозге иерархически организовано и взаимодействие неокортекса с БГ: *кортико-стриарная система* имеет четкую иерархическую структуру — состоит из типовых модулей с единообразной схемотехникой. Каждый такой модуль захватывает кусочек коры, обучаемый на ошибках своих предсказаний, и часть базальных ганглий, обучаемых допаминовыми подкрепле-

ниями из среднего мозга. С точки зрения автора эта особенность нашего мозга является ключевой для построения сильного ИИ, поскольку позволяет строить иерархические планы достижения очень далеких целей. И чем больше становилась площадь коры, тем более далекие и сложные планы были доступны нашим предкам, создавая давление отбора в пользу дальнейшего увеличения размеров мозга.

## **4. Конструирование искусственной психики роботов**

Покажем теперь, как понимание описанной выше логики развития архитектуры мозга можно использовать при конструировании сильного ИИ, т.е. искусственной психики роботов.

Если отвлечься от биологических деталей, архитектура управления мышлением и поведением в нашем мозге представляет собой иерархию управляющих уровней, устроенных единообразно и осуществляющих управление каждый на своем масштабе времени. При этом, более низкие уровни ищут пути реализации планов, спущенных из более высоких уровней [7]. На основе такой архитектуры в лаборатории когнитивных архитектур МФТИ создан программный код ADAM (Adaptive Deep Autonomous Machine, [8]) — действующий прототип искусственной психики, способный планировать свое поведение на многих масштабах времени. По мере накопления опыта взаимодействия с внешней средой, ADAM наращивает число своих уровней, обучаясь целенаправленному поведению на все более долгих временных масштабах. Разработанная и отлаженная в рамках проекта ADAM архитектура сильного ИИ сможет использоваться в самых разных сервисах и продуктах, требующих креативного машинного мышления.

## **5. Заключение**

Резюмируя, в данной работе описан подход к созданию сильного ИИ, основанного на принципах работы мозга. Впервые в мире создана действующая модель искусственной психики с иерархической архитектурой глубокого обучения с подкреплением, способная самостоятельно планировать свое поведение на сколь угодно большом временном горизонте. Этот подход может быть использован при создании операционных систем автономных роботов, способных в процессе своей жизни накапливать опыт решения самых разных задач.

## Список литературы

- [1] R. Bellman, “The theory of dynamic programming”, *Bulletin of the American Mathematical Society*, **60**:6 (1954), 503-515.
- [2] M.Wainwright, “Stochastic approximation with cone-contractive operators: Sharp  $l_\infty$ -bounds for  $Q$ -learning”, *arXiv preprint arXiv:1905.06265*, (2019) May 15.
- [3] R. Sutton, “Dyna, an integrated architecture for learning, planning, and reacting”, *ACM Sigart Bulletin*, **2**:4 (1991), 160-163.
- [4] T. Kohonen, “Self-organized formation of topologically correct feature maps”, *Biological cybernetics*, **43**:1 (1982), 59-69.
- [5] V. Mountcastle, “The columnar organization of the neocortex”, *Brain: a journal of neurology*, **120**:4 (1997), 701-722.
- [6] S. Herculano-Houzel, *The human advantage: A new understanding of how our brain became remarkable*, MIT Press, 2016.
- [7] Шумский С.А., “Глубокое структурное обучение: новый взгляд на обучение с подкреплением”, *Сборник научных трудов XX Всероссийской научной конференции Нейроинформатика-2018, Лекции по нейроинформатике*, 2018, 11-43.
- [8] Шумский С.А., Басков О.В., “Программный Агент глубокого иерархического обучения с подкреплением ADAM Deep Control”, *Государственная регистрация программ для ЭВМ*, 2021, RU 2021660307.

### Brain-inspired new AGI architectures Shumsky S.A.

We consider how in the course of biological evolution the brain gradually formed a hierarchical architecture of deep reinforcement learning. Based on this architecture, a working AGI model, ADAM, is proposed, capable of learning more and more complex behavioral skills as the depth of the hierarchy of control levels increases.

*Keywords:*artificial general intelligence, deep reinforcement learning, hierarchical control systems.

## References

- [1] R. Bellman, “The theory of dynamic programming”, *Bulletin of the American Mathematical Society*, **60**:6 (1954), 503-515.
- [2] M.Wainwright, “Stochastic approximation with cone-contractive operators: Sharp  $l_\infty$ -bounds for  $Q$ -learning”, *arXiv preprint arXiv:1905.06265*, (2019) May 15.
- [3] R. Sutton, “Dyna, an integrated architecture for learning, planning, and reacting”, *ACM Sigart Bulletin*, **2**:4 (1991), 160-163.
- [4] T. Kohonen, “Self-organized formation of topologically correct feature maps”, *Biological cybernetics*, **43**:1 (1982), 59-69.



- [5] V. Mountcastle, “The columnar organization of the neocortex”, *Brain: a journal of neurology*, **120**:4 (1997), 701-722.
- [6] S. Herculano-Houzel, *The human advantage: A new understanding of how our brain became remarkable*, MIT Press, 2016.
- [7] Shumsky S.A., “Deep structural learning: a new look at reinforcement learning”, *Collection of scientific papers of the XX All-Russian scientific conference Neuroinformatics-2018, Lectures on neuroinformatics*, 2018, 11-43 (In Russian).
- [8] Shumsky S.A., Baskov O.V., “Software Agent with deep hierarchical reinforcement learning ADAM Deep Control”, *State registration of computer programs*, 2021, 2021660307 (In Russian).

## Часть 2.

# Математика и компьютерные науки

# К вопросу о функциональной системе автоматов с операцией суперпозиции

Д. Н. Бабин<sup>1</sup>

В бесконечно порожденной функциональной системе автоматов с операцией суперпозиции существуют как предполные классы, так и классы, не вкладывающиеся ни в один предполный. В статье приведены примеры как первых, так и вторых классов.

**Ключевые слова:** конечный автомат, суперпозиция, замкнутый класс.

Известно, что решение задач полноты и выразимости для систем автоматных функций наталкивается на существенные трудности [1]. Так в работе [2] установлена континуальность множества предполных классов для систем автоматных функций, а в работе [3] установлена алгоритмическая неразрешимость задачи полноты относительно суперпозиции и обратной связи для конечных систем автоматных функций.

Обозначим класс автоматов без входа (константных) через  $K$ , замыкание множества автоматов с  $n$  состояниями – через  $P(n)$ , через  $P_n$  обозначим класс автоматов с  $n$  входами, через  $[M]$  обозначим замыкание относительно суперпозиции множества автоматов  $M$ .

Для систем автоматов с операцией одной суперпозиции конечных полных систем нет [1], а система автоматов с двумя входами образует полную систему [4]. Оставался открытым вопрос о наличии класса автоматов, не расширяющегося до предполного, этот вопрос был положительно решён в работе [5]. Кроме того, в [6] был описан континуум классов расширяющихся до предполного класса.

Из работ [5, 6] следуют

**Теорема 1.**  $[P(n) \cup K]$  не расширяется до предполного при  $n > 1$ .

**Теорема 2.**  $P(n)$  расширяется до предполного.

**Теорема 3.** Любой конечно порождённый класс автоматов расширяется до предполного.

Имеет место следующая

**Теорема 4.**  $P_1$  расширяется до предполного.

---

<sup>1</sup>Бабин Дмитрий Николаевич — д.ф.-м.н., профессор механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, e-mail: d.n.babin@mail.ru.

Babin Dmitry Nikolaevich — PhD, Professor of the Faculty of Mechanics and Mathematics, Lomonosov MSU.

В самом деле: одностепенные автоматы имеют в каждом состоянии линейные выходные функции. Нетрудно видеть, что класс автоматов, имеющих линейную выходную функцию в начальном состоянии, содержит класс линейных автоматов и является предполным.

## Список литературы

- [1] Кудрявцев В.Б., Алешин С.В., Подколзин А.С., *Введение в теорию автоматов*, Наука, Москва, 1985.
- [2] Кудрявцев В.Б., “О мощностях множеств предполных классов некоторых функциональных систем, связанных с автоматами”, *ДАН СССР*, **151**:3 (1963), 493–496.
- [3] Кратко М.И., “Алгоритмическая неразрешимость проблемы распознавания полноты для конечных автоматов”, *ДАН СССР*, **155**:1 (1964), 35–37.
- [4] Бабин Д.Н., “О полноте двухместных автоматных функций относительно суперпозиции”, *Дискретная математика*, **1**:4 (1989), 423–431.
- [5] Бабин Д.Н., “Класс автоматов с суперпозициями, не расширяющийся до предполного”, *Интеллектуальные системы. Теория и приложения*, **20**:4 (2016), 162–173.
- [6] Бабин Д.Н., Кудрявцев В.Б., *Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика*, 2020, № 2, 55–58.

### **On the question of a functional system of automata with a superposition operation** **Babin D.N.**

In an infinitely generated functional system of automata with a superposition operation, there are both pre-complete classes and classes that do not fit into any pre-complete one. The article provides examples of both the first and second classes.

*Keywords:* finite automaton, superposition, closed class.

## References

- [1] Kudryavtsev V.B., Aleshin S.V., Podkolzin A.S., *Introduction to the theory of automata*, Nauka, Moscow, 1985 (In Russian).
- [2] Kudryavtsev V.B., “On the cardinalities of sets of precomplete classes of some functional systems associated with automata”, *DAN SSSR*, **151**:3 (1963), 493–496 (In Russian).
- [3] Kratko M.I., “Algorithmic undecidability of the completeness recognition problem for finite automata”, *DAN SSSR*, **155**:1 (1964), 35–37 (In Russian).
- [4] Babin D.N., “On the completeness of two-place automatic functions with respect to superposition”, *Discrete Mathematics*, **1**:4 (1989), 423–431 (In Russian).

- [5] Babin D.N., “A class of automata with superpositions that does not expand to precomplete”, *Intelligent systems. Theory and applications*, **20**:4 (2016), 162–173 (In Russian).
- [6] Babin D.N., Kudryavtsev V.B., *Bulletin of Moscow University. Series 1: Mathematics. Mechanics*, 2020, № 2, 55–58 (In Russian).

# О новом алгоритме достижения консенсуса для стабильных криптовалют

Э. Э. Гасанов<sup>1</sup>, М. Б. Суюнбекова<sup>2</sup>

Криптовалюты, цена которых привязана к физическим активам, называют стабильными (стейблкоинами). В данной работе показано, что для стабильных криптовалют использование алгоритма достижения консенсуса типа Proof-Of-Work нецелесообразно, потому что за проделанную трудную работу для достижения консенсуса кто-то должен будет заплатить, и количество денег в системе будет уменьшаться. В данной работе предлагается новый алгоритм достижения консенсуса, основанный на принципе лотереи, который может быть использован для стабильных криптовалют и для цифровых валют центральных банков.

**Ключевые слова:** Криптовалюты, цифровые валюты центральных банков, алгоритмы достижения консенсуса.

Традиционно финансовые транзакции, т.е. передача денежных средств от одного лица другому, осуществляется через посредничество банков. Криптовалюта была введена для того, чтобы отказаться от услуг банков для осуществления финансовых транзакций. Фактически криптовалюта представляет собой распределенную базу данных транзакций, когда каждый пользователь хранит у себя весь список транзакций. Количество денег на счету пользователя может быть проверено с использованием данного списка. Чтобы не было разногласий важно, чтобы у каждого пользователя был один и тот же список транзакций. Этот список представляет собой цепь блоков — *блокчейн*, где каждый блок содержит некоторое множество транзакций. Каждый пользователь может сформировать свой блок транзакций, но добавление блоков в цепь осуществляется через некоторые фиксированные интервалы, и в каждый момент в цепь может быть добавлен только один блок. Алгоритм, который позволяет выбрать из всего множества сформированных блоков один блок, который будет добавлен в цепь, называется *алгоритмом достижения консенсуса*.

---

<sup>1</sup> Гасанов Эльяр Эльдарович — профессор каф. математической теории интеллектуальных систем мех.-мат. ф-та МГУ, e-mail: el\_gasnov@mail.ru.

Gasanov Elyar Eldarovich — professor, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Mechanics and Mathematics, Chair of Mathematical Theory of Intelligent Systems.

<sup>2</sup> Суюнбекова Манзурахон Батыржановна — аспирант каф. математической теории интеллектуальных систем мех.-мат. ф-та МГУ, e-mail: artem.propazhin@mail.ru.

Suyunbekova Manzurakhon Batyrzhanovna — graduate student, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Mechanics and Mathematics, Chair of Mathematical Theory of Intelligent Systems.

Первая в мире криптовалюта появилась в 2008 году и называется биткоином [1]. Алгоритм достижения консенсуса в биткоине состоит в следующем. Новый блок, добавляемый в блокчейн биткоина, содержит хеш предыдущего блока. В новом, ещё неподтверждённом блоке есть специальная область, которую можно менять — «nonce». По данным добавляемого блока вычисляется хеш. Если хеш не превышает установленного заранее фиксированного порога, то хеш считается правильным, и новый блок может быть добавлен в блокчейн. Иначе nonce меняется и пересчитывается хеш. Пользователи, которые пытаются добавить свой блок в блокчейн, подбирая nonce, называются *майнерами*. Майнер, который первым получил хеш, не превышающий установленный порог, считается выигравшим, и его блок добавляется в блокчейн. Порог подбирается таким образом, чтобы правильный хеш нельзя было получить быстрее определенного времени, задающего интервалы между добавляемыми блоками. За добавленный блок выигравший получает вознаграждение в виде биткоинов. Остальные майнеры начинают игру заново, пытаясь добавить свой блок в новый блокчейн. Такой процесс вычисления хеша и добавления новых блоков в блокчейн называется *майнингом*, а алгоритм достижения консенсуса, при котором выигравшим считается тот, кто первый посчитал правильный хеш, называется Proof-Of-Work.

Как правило выигрывает тот, у кого имеются серьезные вычислительные мощности для быстрого вычисления хеша. При майнинге тратится огромное количество энергии, причем все вычисления тратятся впустую в том плане, что ничего по факту не производится, но трудоёмкость подсчёта хэша в биткоинах гарантирует сохранение целостности цепочки, невозможность её подделки.

Главным недостатком биткоина является то, что эта криптовалюта ничем не обеспечена, и формирование ее цены носит спекулятивный характер. Поэтому возникает необходимость в криптовалютах, цена которых привязана к физическими активами (фиатные валюты, драгоценные камни, природные ресурсы, ценные бумаги и пр.). Такие криптовалюты называют *стейблкоинами* («stable» — «стабильный») [2]. В числе стабильных криптовалют значатся Tether, Dai, а также цифровые валюты центральных банков — ЦВЦБ. Так, в октябре 2020 года Банк России представил доклад для общественных консультаций по созданию цифрового рубля <sup>1</sup>, а в апреле 2021, после его широкого обсуждения, опубликовал концепцию цифрового рубля <sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup>Сайт Центрального Банка РФ. URL: [https://www.cbr.ru/analytics/d\\_ok/dig\\_ruble/](https://www.cbr.ru/analytics/d_ok/dig_ruble/)

<sup>2</sup>Сайт Центрального Банка РФ. URL: [https://www.cbr.ru/Content/Document/File/120075/concept\\_08042021.pdf](https://www.cbr.ru/Content/Document/File/120075/concept_08042021.pdf)

В правильных стабильных криптовалютах нельзя использовать алгоритм Proof-Of-Work в качестве алгоритма достижения консенсуса, поскольку за потраченную на вычисления энергию надо платить, что приведет к вымыванию физических активов и снижению ценности криптовалюты. Этим объясняется актуальность разработки новых алгоритмов достижения консенсуса. Обзор по существующим алгоритмам достижения консенсуса можно найти в [3], [4], [5].

Аналогично созданию ЦВЦБ для регуляции денежных средств страны центральным банком в условиях цифрового мира, можно рассмотреть создание криптовалюты, а именно стейблкоина, для конкретной отрасли. Преимуществами создания и использования отраслевой криптовалюты можно считать рационализацию криптовалюты; мониторинг товара; свободную реализацию продажи продуктов компаний-участниц отрасли и выгоду от всех продаваемых товаров. Как следствие из вышеперечисленного можно получить оживление рынка отрасли, рост спроса на товар, а также свободное обращение капитала и поток инвестиций, что позволит компаниям-участницам отказаться от высокопроцентных кредитов у банков и других внешних вкладчиков.

В ходе рассмотрения отраслевой криптовалюты, подразумевается, что любой актив отрасли (каждая единица товара, фиатные деньги, ценные бумаги, здания, оборудование и т.д.) будет учитываться при эмиссии валюты. Каждая транзакция фиксирует куплю-продажу продукта отрасли, передачу средств. Таким образом с помощью блокчейна можно отследить историю каждого единичного товара, и через цепочку данных можно осуществлять мониторинг.

У криптовалют есть огромный потенциал, даже если учесть лишь блокчейн – децентрализованную систему хранения данных. Поэтому, добавив к уже существующей в криптовалютах высокой степени защиты и анонимности, её подкреплённость осязаемым, понятным для каждого пользователя сертифицированным товаром, а также исключив энергозатратный пересчёт поспе, можно было бы вывести термин «криптовалюта» на новый уровень.

В данной работе предлагается новый алгоритм достижения консенсуса, который не требует существенных затрат энергии, и он основывается на принципе лотереи.

Предлагаемый подход состоит из четырех стадий.

Первая стадия называется входом в игру. Игроки входят в игру по очереди. Первый входящий в игру объявляет свой «вклад» — некоторое натуральное число  $c_1$ . В результате он получает свой интервал  $[l_1, r_1)$ , где  $l_1 = 0$ ,  $r_1 = l_1 + c_1$ . Предположим, что уже  $m$  игроков вступили в игру,  $m$ -й игрок получил интервал  $[l_m, r_m)$ . Вступая в игру,  $(m + 1)$ -й игрок объявляет свой вклад  $c_{m+1}$  и получает свой интервал  $[l_{m+1}, r_{m+1})$ ,



где  $l_{m+1} = r_m$ ,  $r_{m+1} = l_{m+1} + c_{m+1}$ . Пусть в игру вступило  $n$  игроков и  $L = \sum_{i=1}^n c_i$  — суммарный вклад всех игроков.

На второй стадии каждый из игроков вырабатывает некоторое достаточно большое случайное число  $a_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ .

На третьей стадии игроки обмениваются случайными числами, и в результате обмена каждый игрок вычисляет полную сумму случайных чисел  $S = \sum_{i=1}^n a_i$ .

На четвертой стадии каждый игрок вычисляет число  $R = S \bmod L$ . Выигравшим признается тот игрок  $i$ , для которого выполняется  $R \in [l_i, r_i)$ . Выигравший игрок забирает всю сумму  $S$  за вычетом заранее обговоренной комиссии, а также добавляет свой блок в блокчейн, высчитав хеш. Отметим, что в данном подходе необходимость в поспе пропадает.

Наиболее сложным является третья стадия, в которой должны обмениваться информацией игроки, не доверяющие друг другу.

Рассмотрим протокол, с помощью которого два игрока, не доверяющие друг другу, могут обмениваться информацией.

Рассмотрим следующую игру двух игроков  $A$  и  $B$ . Игрок  $A$  вырабатывает случайное натуральное число  $a$ , а игрок  $B$  — случайное натуральное число  $b$ . Если  $a + b$  нечётное число, то побеждает игрок  $A$ . Иначе победителем является игрок  $B$ .

Возникает вопрос: как игроку  $A$  передать своё число  $a$  игроку  $B$ , а тому в свою очередь предать своё число  $b$  игроку  $A$  так, чтобы никто из них не смог смошенничать. Например, если игрок  $A$  первым отправит своё число  $a$ , то игрок  $B$  сможет подобрать число  $b$  так, чтобы  $a + b$  был чётным, и отправит  $A$  не случайное число, а выбранное.

Эту задачу можно решить с помощью протокола, подобного протоколу «Подбрасывание монеты по телефону» Мануэля Блума [6]. Осуществляется обмен с помощью однонаправленной функции  $f(x)$  следующим образом. Игрок  $A$  передаёт игроку  $B$  число  $f(a)$ . Игрок  $B$  передаёт игроку  $A$  число  $f(b)$ . Игрок  $A$  передаёт игроку  $B$  число  $a$ . Игрок  $B$  передаёт игроку  $A$  число  $b$ . Игрок  $A$  вычисляет число  $f(b)$  и убеждается, что оно совпадает с полученным числом  $f(b)$ , а игрок  $B$  вычисляет число  $f(a)$  и убеждается, что оно совпадает с полученным числом  $f(a)$ . Игроки суммируют числа  $a$  и  $b$ , и у обоих получается число  $a + b$ .

Описанный выше протокол обмена между игроками  $A$  и  $B$  будем обозначать через  $O$  и представлять как  $O_{A,B}(a, b)$ .

Теперь рассмотрим протокол обмена данными между  $n$  игроками, не доверяющими друг другу.

Пусть имеется  $n$  игроков  $A_1, A_2, \dots, A_n$ , которые вырабатывают случайные числа  $a_1, a_2, \dots, a_n$  соответственно. Протокол обмена этими числами будем обозначать через  $P$ . В результате этого протокола у каждого игрока формируется число  $a_1 + \dots + a_n$ , данный протокол будем представ-

лять как  $P(a_1, \dots, a_n)$ . В качестве базовой операции используем протокол  $O$ . Описывать протокол будем индуктивно.

Обозначим:  $O_{i,j}(x, y) := O_{A_i, A_j}(x, y)$ .

**Базис индукции.** Протокол  $P$  для двух игроков с числами  $a_1$  и  $a_2$  — это  $O_{1,2}(a_1, a_2)$ . Протокол  $P$  для трёх игроков с числами  $a_1, a_2$  и  $a_3$  — это последовательность протоколов  $O_{1,2}(a_1, a_2)$ ,  $O_{1,3}(a_1 + a_2, a_3)$ ,  $O_{2,3}(a_1 + a_2, a_3)$ . При этом игрок  $A_3$  добавляет число  $a_1 + a_2$  в свою сумму только один раз, ведь протокол  $O_{2,3}(a_1 + a_2, a_3)$  нужен по сути только игроку  $A_2$  для получения числа  $a_3$ .

**Индуктивный переход.** Нам дано  $n$  натуральных чисел  $a_1, \dots, a_n$ , и пусть по предположению индукции мы умеем применять протокол  $P$  к числу игроков, меньшему чем  $n$ .

Применим протокол  $P$  дважды, разделив игроков на два подмножества:  $P(a_1, \dots, a_k)$  и  $P(a_{k+1}, \dots, a_n)$ , где  $k = \lfloor \frac{n}{2} \rfloor$ . В результате первые  $k$  игроков получают число  $s_1 = a_1 + \dots + a_k$ , а следующие  $n - k$  игроков получают число  $s_2 = a_{k+1} + \dots + a_n$ . Теперь проведём обмен полученными числами между подмножествами так, чтобы первые  $k$  игроков получили число  $s_2$ , а следующие  $n - k$  игроков число  $s_1$  и данную операцию назовём *слиянием протоколов*.

Рассмотрим два случая.

1)  $n = 2k$ . Выполняем протоколы  $O_{1,k+1}(s_1, s_2), \dots, O_{k,n}(s_1, s_2)$ . Таким образом  $i$ -тый игрок обменивается числом с  $(i + k)$ -ым,  $i = \overline{1, k}$ . В результате все игроки получают число  $s_1 + s_2$ .

2)  $n = 2k - 1$ . Выполняем протоколы  $O_{1,k+1}(s_1, s_2), \dots, O_{k-1,n}(s_1, s_2)$ . Затем выполняем протокол  $O_{k,k+1}(s_1, s_2)$ , причём в последнем протоколе игрок  $A_{k+1}$  обменивается числом  $s_2$ , а не числом  $s_1 + s_2$  и число  $s_1$ , которое он получил от двух игроков, он учитывает в своей сумме один раз. Таким образом при слиянии  $P(a_1, \dots, a_k)$  и  $P(a_{k+1}, \dots, a_n)$  игрок  $A_{k+1}$ , игрок с наименьшим индексом из второго подмножества игроков, участвует в обмене два раза, а все остальные по одному. В результате все игроки получают у себя число  $s_1 + s_2$ .

Обозначим через  $Q(n, i)$  количество протоколов  $O$ , в которых участвует  $i$ -й игрок, при выполнении протокола  $P$  для  $n$  игроков.

**Теорема 1.** *Предложенный протокол  $P$  решает задачу достижения консенсуса, и для любого натурального  $n$ ,  $n > 1$ , и для любого номера  $i \in \{1, \dots, n\}$  выполнены неравенства  $\lceil \log_2 n \rceil \leq Q(n, i) \leq \lfloor \log_2 n \rfloor + 1$ .*

Таким образом каждый игрок во время игры совершает логарифмическое от общего количества игроков число элементарных обменов.

В дальнейшем планируется исследование устойчивости предложенного алгоритма к различным атакам.

## Список литературы

- [1] Nakamoto S., “Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System”, *Self-published Paper*, 2008, 9 pp.
- [2] Еременко Ю.М., Козлова Н.Ш., “Стейблкоин как стабильная криптовалюта”, *Студент и наука*, **4(11)** (2019), 17–21
- [3] Huanliang Xiong, Muxi Chen, Canghai Wu, Yingding Zhao, Wenlong Yi, “Research on Progress of Blockchain Consensus Algorithm: A Review on Recent Progress of Blockchain Consensus Algorithms”, *Future Internet*, **14:2** (2022), 47, <https://www.mdpi.com/1999-5903/14/2/47>.
- [4] Тороев А.С., Сизоненко А.Б., “Анализ эффективности алгоритмов достижения консенсуса в распределенных системах обработки данных на основе технологии блокчейн”, *Вестник компьютерных и информационных технологий*, **17:11(197)** (2020), 13–22.
- [5] Бахвалова Е.А., Судаков В.А., “Исследование алгоритмов консенсуса для блокчейн-платформ”, *Препринты ИПМ им.М.В.Келдыша*, **26** (2021), 1–16.
- [6] Blum M., “Coin Flipping by Telephone: A Protocol for Solving Impossible Problems”, *ACM SIGACT News*, **15:1** (1981), 23–27.

### **On a new algorithm for reaching consensus for stablecoins Gasanov E.E., Suyunbekova M.B.**

Cryptocurrencies, the price of which is tied to physical assets, are called stablecoins. This paper shows that for stablecoins, the use of a Proof-Of-Work consensus-building algorithm is impractical, because someone will have to pay for the hard work done to reach a consensus, and the amount of money in the system will decrease. This paper proposes a new consensus-building algorithm based on the lottery principle that can be used for stablecoins and for digital currencies of central banks.

*Keywords:* Cryptocurrencies, digital currencies of central banks, consensus building algorithms.

## References

- [1] Nakamoto S., “Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System”, *Self-published Paper*, 2008, 9 pp.

- [2] Eremenko Yu.M., Kozlova N.Sh., “Stablecoin as a stable cryptocurrency”, *Student and Science*, **4(11)** (2019), 17–21 (In Russian)
- [3] Huanliang Xiong, Muxi Chen, Canghai Wu, Yingding Zhao, Wenlong Yi, “Research on Progress of Blockchain Consensus Algorithm: A Review on Recent Progress of Blockchain Consensus Algorithms”, *Future Internet*, **14:2** (2022), 47, <https://www.mdpi.com/1999-5903/14/2/47>.
- [4] Toroev A.S., Sizonenko A.B., “Analysis of The Effectiveness of Consensus-Building Algorithms in Distributed Data Processing Systems Based on Blockchain Technology”, *Vestnik komp'uternykh i informatsionnykh tekhnologii*, **17:11(197)** (2020), 13–22 (In Russian).
- [5] Bakhvalova E.A., Sudakov V.A., “Research of consensus algorithms for blockchain platforms”, *Keldysh Institute Preprints*, **26** (2021), 1–16 (In Russian).
- [6] Blum M., “Coin Flipping by Telephone: A Protocol for Solving Impossible Problems”, *ACM SIGACT News*, **15:1** (1981), 23–27.

# Процессный подход к моделированию и верификации параллельных программ

А. М. Миронов<sup>1</sup>

В докладе излагается новая математическая модель параллельных программ и приводится пример ее применения для верификации параллельной программы перемножения матриц.

**Ключевые слова:** параллельные программы, распределенные процессы, верификация.

## 1. Введение

**Параллельные программы** – это программы, предназначенные для исполнения на многопроцессорных вычислительных системах (МПВС). Проблема разработки корректных и безопасных параллельных программ представляет в настоящее время исключительно высокую актуальность. Формальное обоснование свойств корректности и безопасности параллельных программ (называемое также **верификацией** параллельных программ) является сложной математической задачей. Существующие методы решения данной задачи пригодны лишь для достаточно ограниченного класса параллельных программ.

Одним из наиболее широко используемых языков для описания параллельных программ является язык MPI (Message Passing Interface). В настоящей работе вводится новая математическая модель параллельных программ, на основе которой можно решать задачи верификации параллельных программ, представленных на некотором подмножестве MPI. Введенная модель иллюстрируется применением к решению задачи верификации MPI-программы умножения матриц.

Наиболее важной особенностью предлагаемого подхода является возможность его применения для верификации параллельных программ, которые могут порождать неопределенное число процессов. Среди других подходов к моделированию и верификации таких программ следует отметить подход в [4]. В этой работе представлен инструмент ParTypes для моделирования и верификации параллельных программ, порождающих неопределенное число процессов. К сожалению, данный инструмент

---

<sup>1</sup>Миронов Андрей Михайлович — доцент, к.ф.м.н., кафедра математической теории интеллектуальных систем мех.-мат. ф-та МГУ, e-mail: amironov66@gmail.com, телефон +7-(916)-462-20-36, 119991, Россия Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, д.1, механико-математический факультет, комн. 12-01.

Mironov Andrew Mikhailovich — associate professor, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Mechanics and Mathematics, Chair of Mathematical Theory of Intellectual Systems

не работает для параллельных программ со свойством wildcard receives, которое имеет следующий смысл: в параллельной программе допускается использование действий приема сообщений от произвольного процесса (т.е. при выполнении действия такого типа номер процесса, от которого принимается сообщение, можно определить лишь после выполнения этого действия). В частности, при помощи подхода, лежащего в основе данного инструмента, невозможно верифицировать MPI программу для умножения матриц, рассматриваемую в настоящей статье. Существуют и другие подходы с использованием символического исполнения и проверки модели, см. например [1]–[3], [5]–[9], однако все эти подходы пригодны лишь для анализа параллельных программ, порождающих заранее заданное количество процессов. Преимуществом данной работы является пример решения задачи верификации такой MPI-программы, которую невозможно верифицировать на основе использования других известных моделей параллельных программ.

## 2. Описание модели MPI-программы

Модель MPI-программы представляет собой распределенный процесс (РП)  $\mathcal{P}$ , который является семейством последовательных процессов (ПП)  $P_i$  ( $i \geq 0$ ). Каждый ПП представляется графом, ребра которого помечены действиями. Действиями могут быть присваивания, условные переходы, и команды отправки и приема сообщений. Кроме того, в записи действий могут использоваться вспомогательные переменные, операции с которыми не являются исполняемыми операциями программы, а предназначены лишь для облегчения записи утверждений о программе.

**Элементарные действия (ЭД)** – это записи следующих видов:

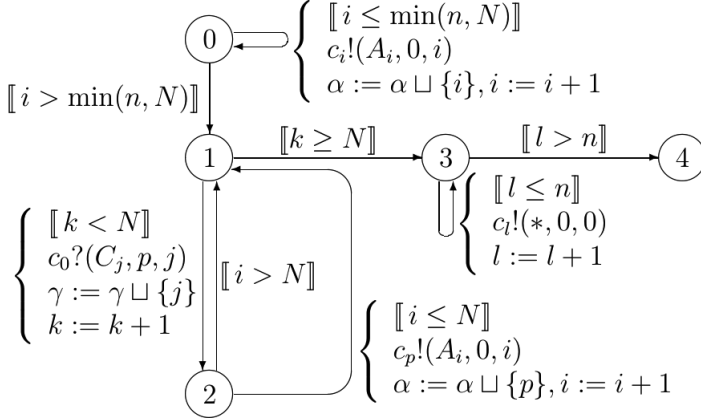
$ce, \quad c?e, \quad e := e', \quad \llbracket \varphi \rrbracket$ , где  $c$  – имя канала,  $e, e'$  – термы,  $\varphi$  – формула,

которые называются **посылкой** сообщения  $e$  в канал  $c$ , **приемом** сообщения  $e$  из канала  $c$ , **присваиванием**, и **условным переходом**, соответственно. **Действие** – это конечная последовательность ЭД, в которой имеется не более одного посылки или приема.

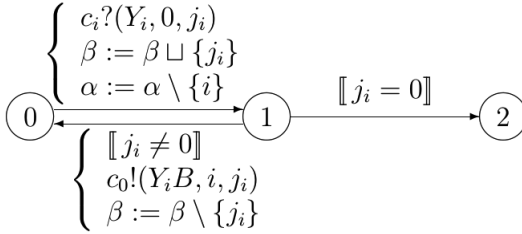
Например, РП  $\mathcal{P}_\Pi = \{P_i \mid i = 0, 1, \dots\}$ , моделирующий MPI-программу  $\Pi$  умножения матриц, имеет следующий вид. Входными переменными  $\Pi$  являются  $A, B$  (матрицы-сомножители),  $N$  (число строк в  $A$ ),  $n$  (число порожденных процессов). Выходная переменная –  $C$  (матрица-результат, после выполнения программы значение  $C$  должно быть равно произведению  $AB$ ). Вспомогательные переменные –  $\alpha, \beta, \gamma$  их значения имеют следующий смысл: для каждого состояния  $s$  РП  $\mathcal{P}$   $\alpha^s$  состоит из номеров каналов из  $\{c_1, \dots, c_n\}$  с непустым содержимым

в состоянии  $s$ ,  $\beta^s$  состоит из номеров строк матрицы  $A$ , для которых в состоянии  $s$  вычисляется их произведение на  $B$ ,  $\gamma^s$  равно множеству номеров всех строк, которые  $P_0$  записал в  $C$  до момента прихода РП  $\mathcal{P}_\Pi$  в состояние  $s$ .

ПП  $P_0$  имеет следующий вид:



Последовательный процесс  $P_i$  для  $i > 0$  имеет следующий вид:



Верификация РП  $\mathcal{P}$  заключается в доказательстве утверждения о том, что после завершения его выполнения верно равенство  $C = AB$ . Данное утверждение доказывается с помощью следующей теоремы.

**Теорема 1.** Для каждого состояния  $s$  РП  $\mathcal{P}$  верны утверждения:

- 1)  $\alpha^s \subseteq \{1, \dots, i^s - 1\}$ ,  $i^s - 1 \leq N$ ,  $|\gamma^s| = k^s \leq N$ ,
- 2) если  $at_{P_0}^s = 1$  и  $k^s < N$ , то  $k^s < i^s - 1$ ,  $[c_0]_2^s \cap \alpha^s = \emptyset$ ,
- 3)  $\forall i = 1, \dots, n$   $[c_i]^s = 1$ , если  $i \in \alpha^s$ , и 0 иначе,
- 4)  $at_{P_i}^s = 1 \Rightarrow (i \notin \alpha^s) \wedge (j_i^s \notin \gamma^s)$ ,
- 5)  $at_{P_0}^s = 2 \Rightarrow p^s \notin \alpha^s$ ,  $p^s \in \{1, \dots, i^s - 1\}$ ,
- 6)  $[c_1]_3^s \sqcup \dots \sqcup [c_n]_3^s \sqcup \beta^s \sqcup [c_0]_3^s \sqcup \gamma^s = \{1, \dots, i^s - 1\}$ ,
- 7)  $\forall p \in \alpha^s$   $[c_p]^s$  имеет вид  $\{(A_i, 0, i)\}$ , где  $i \in \{1, \dots, N\}$ ,
- 8) каждый элемент  $[c_0]^s$  имеет вид  $(A_i B, p, i)$ , где  $i \in \{1, \dots, N\}$ ,

$$9) \forall j \in \gamma^s \ C_j = A_j B, \ k^s = N \Rightarrow \gamma^s = \{1, \dots, N\}.$$

Все эти утверждения обосновываются индуктивно: они верны в начальном состоянии РП  $\mathcal{P}$ , и сохраняют свою истинность после каждого перехода РП  $\mathcal{P}$ . Также нетрудно доказать, что в определенном выше РП  $\mathcal{P}$  нет тупиковых состояний, и любое выполнение РП  $\mathcal{P}$  завершается после конечного числа шагов.

## Список литературы

- [1] V. Forejt, S. Joshi, D. Kroening, G. Narayanaswamy, S. Sharma, Precise Predictive Analysis for Discovering Communication Deadlocks in MPI Programs, In: ACM Transactions on Programming Languages and Systems, V. 39, Issue 4, 2017, 1–27.
- [2] Gopalakrishnan, G., Kirby, R.M., Siegel, S., Thakur, R., Gropp, W., Lusk, E., De Supinski, B.R., Schulz, M., Bronevetsky, G.: Formal analysis of MPI-based parallel programs. Communications ACM 54(12), 82-91, (2011).
- [3] W. Hong, Z. Chen, H. Yu, and J. Wang. Evaluation of model checkers by verifying message passing programs. Science China Information Sciences, volume 62, Article number: 200101 (2019).
- [4] H. A. Lopez, E. R. B. Marques, F. Martins, N. Ng, C. Santos, V.T. Vasconcelos, N. Yoshida, Protocol-based verification of message-passing parallel programs, Proceedings of the 2015 ACM SIGPLAN International Conference on Object-Oriented Programming, Systems, Languages, and Applications - OOPSLA 2015, p. 280-298.
- [5] Z. Luo, M. Zheng, and S. F. Siegel. Verification of MPI programs using CIVL. In EuroMPI. 6:1-6:11, 2017.
- [6] S. F. Siegel, Model Checking Nonblocking MPI Programs. In International Workshop on Verification, Model Checking, and Abstract Interpretation VMCAI 2007, pp 44-58.
- [7] Siegel, S., Mironova, A., Avrunin, G., Clarke, L.: Combining symbolic execution with model checking to verify parallel numerical programs. ACM Transactions on Software Engineering and Methodology, Volume 17, Issue 2, 2008, 1–34.
- [8] Sarvani S. Vakkalanka, Ganesh Gopalakrishnan, and Robert M. Kirby. Dynamic Verification of MPI Programs with Reductions in Presence of Split Operations and Relaxed Orderings. In International Conference on Computer Aided Verification CAV 2008, pp 66-79.



- [9] H. Yu, Z. Chen, X. Fu, J. Wang, Z. Su, J. Sun, C. Huang, and W. Dong. Symbolic Verification of Message Passing Interface Programs. In ICSE '20: Proceedings of the ACM/IEEE 42nd International Conference on Software Engineering, p. 1248-1260, 2020.

## **Process approach to modeling and verification of parallel programs**

**Mironov A.M.**

The report presents a new mathematical model of parallel programs and gives an example of its application for verification of a parallel program for matrix multiplication. *Keywords:* parallel programs, distributed processes, verification.

## **References**

- [1] V. Forejt, S. Joshi, D. Kroening, G. Narayanaswamy, S. Sharma, Precise Predictive Analysis for Discovering Communication Deadlocks in MPI Programs, In: ACM Transactions on Programming Languages and Systems, V. 39, Issue 4, 2017, 1–27.
- [2] Gopalakrishnan, G., Kirby, R.M., Siegel, S., Thakur, R., Gropp, W., Lusk, E., De Supinski, B.R., Schulz, M., Bronevetsky, G.: Formal analysis of MPI-based parallel programs. Communications ACM 54(12), 82-91, (2011).
- [3] W. Hong, Z. Chen, H. Yu, and J. Wang. Evaluation of model checkers by verifying message passing programs. Science China Information Sciences, volume 62, Article number: 200101 (2019).
- [4] H. A. Lopez, E. R. B. Marques, F. Martins, N. Ng, C. Santos, V.T. Vasconcelos, N. Yoshida, Protocol-based verification of message-passing parallel programs, Proceedings of the 2015 ACM SIGPLAN International Conference on Object-Oriented Programming, Systems, Languages, and Applications - OOPSLA 2015, p. 280-298.
- [5] Z. Luo, M. Zheng, and S. F. Siegel. Verification of MPI programs using CIVL. In EuroMPI. 6:1-6:11, 2017.
- [6] S. F. Siegel, Model Checking Nonblocking MPI Programs. In International Workshop on Verification, Model Checking, and Abstract Interpretation VMCAI 2007, pp 44-58.

- [7] Siegel, S., Mironova, A., Avrunin, G., Clarke, L.: Combining symbolic execution with model checking to verify parallel numerical programs. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*, Volume 17, Issue 2, 2008, 1–34.
- [8] Sarvani S. Vakkalanka, Ganesh Gopalakrishnan, and Robert M. Kirby. Dynamic Verification of MPI Programs with Reductions in Presence of Split Operations and Relaxed Orderings. In *International Conference on Computer Aided Verification CAV 2008*, pp 66-79.
- [9] H. Yu, Z. Chen, X. Fu, J. Wang, Z. Su, J. Sun, C. Huang, and W. Dong. Symbolic Verification of Message Passing Interface Programs. In *ICSE '20: Proceedings of the ACM/IEEE 42nd International Conference on Software Engineering*, p. 1248-1260, 2020.

# Построение $p$ -гиперграфов методом имитации отжига

И. Е. Наумов<sup>1</sup>, Е. В. Хворостухина<sup>2</sup>

В данной работе рассматривается актуальная проблема построения гиперграфов. Для решения данной задачи использовался интеллектуальный метод оптимизации — метод имитации отжига. Была разобрана предметная область, основные детали алгоритма и спроектирована программа. Разработанный алгоритм может применяться для решения и других схожих задач.

**Ключевые слова:** гиперграфы, метод имитации отжига, интеллектуальные методы оптимизации

## 1. Введение

Гиперграф — это естественное обобщение понятия графа, ребра которых могут содержать произвольное число вершин. В работе рассматривается задача построения гиперграфов особого класса —  $p$ -гиперграфов. Это широкий и важный класс гиперграфов, поскольку их многообразие охватывает, в частности, проективные и аффинные плоскости [1], содержащие более четырёх точек (в данном случае вершинами гиперграфа служат точки плоскостей, а ребрами — соответствующие прямые). Проблема построения плоскостей и гиперграфов имеет факториальную сложность и остается до сих пор открытой. Так, в 1989 году было доказано с помощью компьютера несуществование проективной плоскости 10 порядка, что заняло около 2000 часов компьютерного времени [2]. Для решения задачи построения  $p$ -гиперграфов мы предлагаем использовать метод имитации отжига [3], позволяющий найти решение задачи поиска глобального экстремума даже для NP-полных задач за относительно небольшое число итераций и полиномиальное время.

Свое название алгоритм получил от аналогии с физическим процессом нагревания и остывания жидкостей, при котором кристаллическое

---

<sup>1</sup> *Наумов Илья Евгеньевич* — магистрант, Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., e-mail: [ilya.naumov.99@mail.ru](mailto:ilya.naumov.99@mail.ru).

*Naumov Ilya Evgenievich* — graduate student, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

<sup>2</sup> *Хворостухина Екатерина Владимировна* — доцент, Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., e-mail: [Khvorostukhina85@gmail.com](mailto:Khvorostukhina85@gmail.com).

*Khvorostukhina Ekaterina Vladimirovna* — associate professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

тело сначала нагревают, затем медленно охлаждают до тех пор, пока не будет сформирована наиболее эффективная кристаллическая решетка.

## 2. Общие сведения о $p$ -гиперграфе

Гиперграфом  $H = (V, E)$  будем называть [4] пару множеств  $V = \{v_i | i \in I\}$ ,  $E = \{e_j | j \in J\}$ , где  $I, J \subseteq \mathbb{N}^*$ . Элементы  $v \in V$  называются вершинами, а элементы  $e \in E$ , соответственно, ребрами (или гиперребрами) и представляют собой произвольные подмножества множества  $V$ . Вершины, лежащие в одном ребре, называются смежными, и несмежными в противном случае.

Пусть  $p$  — натуральное число. Гиперграф  $H = (V, E)$  будем называть  $p$ -гиперграфом [5], если он удовлетворяет следующим аксиомам:

- (A1) в каждом ребре гиперграфа найдется по крайней мере  $p + 1$  вершина;
- (A2) любые  $p$  вершин гиперграфа содержатся точно в одном ребре;
- (A3) в гиперграфе найдется  $p+1$  несмежных вершин.

Для написания программы, осуществляющий построение  $p$ -гиперграфа, нам необходимо определиться с ключевыми моментами алгоритма: инициализация начального состояния, целевая функция, получение нового состояния.

## 3. Инициализация начального состояния

$p$ -гиперграф  $H(V, E)$  характеризуется числом вершин —  $|V|$ , а также числом  $p$ . Для проективной плоскости  $p$  всегда равно 2. В разработанной программе длина ребер гиперграфа фиксирована и равна  $L$ . Из определения следует, что  $L \geq p + 1$ . Число ребер гиперграфа  $H(V, E)$  —  $|E|$ .

Число ребер, инцидентных одной вершине, одинаково для каждой из вершин и равно  $|V_0|$ :

$$|V_0| = \frac{|E| \cdot L}{|V|}.$$

Для инициализации начального состояния гиперграфа строится матрица  $A$  размера  $|E| \times L$ . Здесь строки представляют собой ребра, а столбцы — инцидентные данным ребрам вершины. Столбцы представляют из себя случайные перестановки множества номеров вершин, удовлетворяющих условию: значения в ячейках матрицы попарно различаются в пределах одной строки.

Таким образом, сформированное начальное состояние обеспечивает выполнение аксиом (A1), (A3)  $p$ -гиперграфа. После формирования начального состояния необходимо оценить его целевой функцией.

## 4. Целевая функция

Вследствие того, что данная функция является наиболее используемой частью алгоритма, оказывая существенное влияние на производительность, она должна требовать минимум ресурсов.

Разработанная целевая функция подсчитывает количество нарушений аксиомы (A2) гиперграфа, иными словами, аксиома нарушается, если у прямых более  $p - 1$  общих точек.

Алгоритм заканчивает работу, если значение целевой функции равно нулю. В этом случае результатом работы программы будет  $p$ -гиперграф, на экран будет выведена его матрица инцидентности.

## 5. Получение нового состояния

Для генерации новых состояний в алгоритме используются случайные перестановки с наложенными на них условиями в целях сохранения выполнимости аксиомы (A1).

В начале выбираются два различных ребра  $L_i$  и  $L_j$  ( $1 \leq i, j \leq |E|$ ,  $i \neq j$ ).

Затем из вершин, инцидентных данным ребрам, выбираются по одной вершине  $Q$  и  $P$  так, чтобы  $Q \in L_i$ ,  $P \in L_j$ ,  $Q \notin L_j$ ,  $P \notin L_i$ . После соблюдения всех установленных условий вершины меняются местами: вершина  $Q$  теперь принадлежит ребру  $L_j$ , а вершина  $P$  — ребру  $L_i$ .

После этого, происходит сравнение двух состояний: того, в котором система находится сейчас (обозначим его  $x_k$ ,  $k \in \mathbb{N}_0$ ), и образованного из него нового состояния  $\tilde{x}$ . Если новое состояние лучше, то оно принимается за текущее. В противном случае с вероятностью  $p = e^{-\Delta/T_k}$ , где  $\Delta = f(\tilde{x}) - f(x_k)$ , оно тем не менее может быть принято за следующее состояние системы.  $T_k$  — температура системы на  $k$ -ой итерации,  $T_0$  — начальная температуры, является гиперпараметром и задается вручную. После каждой итерации температура системы понижается:  $T_{k+1} = \alpha T_k$ , где  $\alpha$  — также гиперпараметр, определяющий темп охлаждения системы. Для каждой задачи гиперпараметры подбираются индивидуально [3], вместе с тем, рекомендуемые интервалы для начальной температуры  $T_0$  и темпа охлаждения  $\alpha$  следующие:  $T_0 \in [100; 1000]$ ,  $\alpha \in [0.98; 0.999]$ .

## 6. Результат

Реализация описанного выше алгоритма была осуществлена на универсальном языке программирования Python 3.9. На рисунке 1 представлен график зависимости значения целевой функции от итерации. Результатом данного прогона программы стал 3-гиперграф, состоящий из 8 вершин ( $\text{vertCount}=8$ ), 14 ребер ( $\text{edgeCount}=14$ ) длины 4 ( $\text{lineLong} = 4$ ). При получении этого решения были использованы следующие параметры метода: значение начальной температуры  $T_0 = 100$ , темп охлаждения  $\alpha = 0,9$ . Для его построения потребовалось 5 попыток и 129 итераций. Под попыткой понимается достижение программой пункта останова: либо текущая температура достигла минимально заданной (в этом случае формируется новое начальное состояние и процесс поиска решения начинается сначала), либо искомым гиперграф был найден.

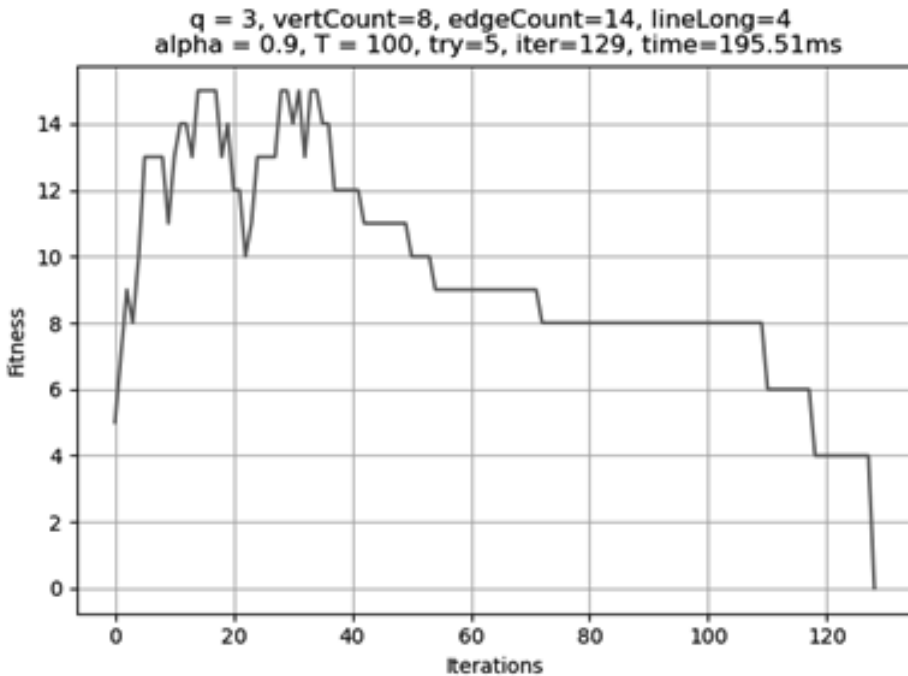


Рис. 1. График зависимости значений целевой функции от итерации.

## 7. Заключение

На данный момент программа способна строить  $p$ -гиперграфы невысоких порядков. Далее планируется усовершенствовать этот алгоритм, а

также использовать для решения данной задачи другие алгоритмы интеллектуальной оптимизации, например, генетические алгоритмы. Разработанный нами алгоритм может быть также применен и для решения других NP-полных задач.

## Список литературы

- [1] Hartshorne R., *Foundations of projective geometry*, W.A. Benjamin Inc., New York, 1967.
- [2] Lam C. W. H., “The Search for a Finite Projective Plane of Order 10”, *The American Mathematical Monthly*, **98**:4 (1991), 305–318.
- [3] Kirkpatrick S., Gelatt C. D., Vecchi M. P., “Optimization by Simulated Annealing”, *Science*, **220**:4598 (1983), 671–680.
- [4] Bretto A., *Hypergraph theory: an Introduction*, Springer, Berlin, 2013.
- [5] Khvorostukhina E. V., Molchanov V. A., “Abstract Characterization of Input Symbol Semigroups of Universal Hypergraphic Automata”, *Lobachevskii Journal of Mathematics*, **41**:2 (2020), 214–226.

### **P-hypergraph design with simulated annealing Naumov I.E., Khvorostukhina E.V.**

In this paper, a present-day problem is considered — the design of hypergraphs. For this purpose, the simulated annealing method was used. The subject area was reviewed along with the main parts of the algorithm and the program was designed. The developed algorithm can be used to solve other similar problems.

**Keywords:** hypergraphs, simulated Annealing, intelligent optimization method

## References

- [1] Hartshorne R., *Foundations of projective geometry*, W.A. Benjamin Inc., New York, 1967.
- [2] Lam C. W. H., “The Search for a Finite Projective Plane of Order 10”, *The American Mathematical Monthly*, **98**:4 (1991), 305–318.
- [3] Kirkpatrick S., Gelatt C. D., Vecchi M. P., “Optimization by Simulated Annealing”, *Science*, **220**:4598 (1983), 671–680.
- [4] Bretto A., *Hypergraph theory: an Introduction*, Springer, Berlin, 2013.
- [5] Khvorostukhina E. V., Molchanov V. A., “Abstract Characterization of Input Symbol Semigroups of Universal Hypergraphic Automata”, *Lobachevskii Journal of Mathematics*, **41**:2 (2020), 214–226.

# О качественном сравнении семейств вещественных функций<sup>1</sup>

А. П. Рыжов<sup>2</sup>, А. К. Синько<sup>3</sup>

В докладе рассматривается задача классификации поведения сложных систем на основе сравнения характерной функции, представленной экспертом, и функции, полученной на основе данных. Такие ситуации характерны для экономики, социологии, биологии и других областей. Для решения задачи проводится описание характерной функции в виде системы нечетких условий, описывающих ее поведение, и предлагается алгоритм вычисления степени соответствия эмпирической функции такой системе нечетких условий.

## 1. Введение

Поведение сложных систем часто невозможно описать принятыми в моделировании и анализе физических или технических систем дифференциальными уравнениями, автоматами и другими математическими средствами. Однако, часто их поведение описывают характерными кривыми, отражающими качественное поведение системы. Примером такого описания может быть описание жизненного цикла продукта [1] (Рис. 1).

Специалисты – маркетологи мыслят именно такими характерными кривыми, и, в зависимости от положения продукта компании на них, организуют свою работу. Сравнение таких «теоретических» кривых, которые дальше мы будем называть характерными кривыми, и реального поведения системы (например, объемов продаж) является нетривиальной задачей и обычно выполняется специалистами. Основная проблема

---

<sup>1</sup>Исследование выполнено при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Мозг, когнитивные системы, искусственный интеллект»

<sup>2</sup> *Рыжов Александр Павлович* — доктор технических наук, профессор МГУ имени М.В. Ломоносова механико-математический факультет кафедра математической теории интеллектуальных систем, e-mail: ryjov@mail.ru.

Ryjev Alexander Pavlovich — Sc.D. in engineering, Ph.D. in mathematics, MBA, professor, Moscow State University, Faculty of Mechanics and Mathematics, Mathematical Theory of Intelligent Systems departments.

<sup>3</sup> *Синько Анастасия Константиновна* — студентка Московского Государственного Университета им. М. В. Ломоносова, механико-математического факультета, e-mail: nastya.sinko.math@gmail.com, научный руководитель: Рыжов Александр Павлович.

Sinko Anastatiya Konstantinovna — student of Moscow State University, Faculty of Mechanics and Mathematics, Mathematical Theory of Intelligent Systems departments



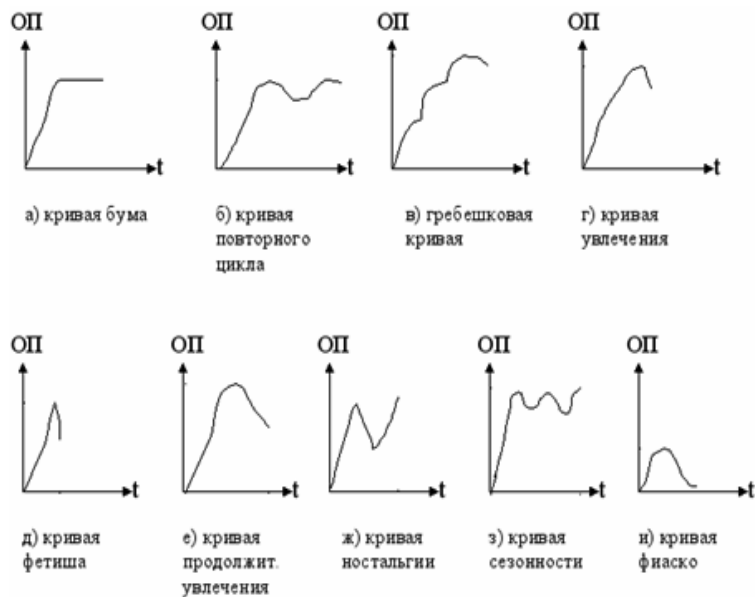


Рис. 1. Классификация жизненных циклов продукта.

заключается в том, что такое сравнение носит качественный характер. Например, в силу разных условий (погодных, экономических, социальных) объем продаж какого-либо товара локально может отличаться от характерного в большую или меньшую сторону, и таких областей может быть несколько, но в «целом» он ведет себя в соответствии с характерной кривой определённого типа.

Аналогичные примеры можно привести из экономики (жизненный цикл экономического уклада – [2]), биологии (кривые выживания – [3]), медицины (гликемические кривые – [4]) и других наук. Данные примеры приводятся и обсуждаются в докладе.

Считаем важным также отметить следующее. Широкое применение компьютерных технологий в различных областях, присущее современной цифровой экономике, делает задачу сравнения характерной кривой и кривых, полученных из данных, массовой. Например, при компьютерном тестировании (количество участников может достигать тысяч человек), по графикам ответов специалист может понять отвечал испытуемый сам или нарушал режим тестирования (ему кто-то помогал, он списывал и пр.). Проведение массовой проверки ответов по этому параметру без автоматизации физически невозможно. Это позволяет характеризовать обсуждаемую задачу не как только представляющую теоретический инте-

рес, но и как имеющую прикладное значение для современных систем оценки и мониторинга многих процессов.

## 2. Основные результаты.

В работе предложен алгоритм, содержащий несколько шагов.

- 1) Масштабирование - сжатие всех графиков функций по оси значений ординат. Все графики после масштабирования будут расположены в отрезке  $[0,1]$ .
- 2) Дискретное представление характерной функции. Этот шаг позволяет далее сравнивать характерную функцию (непрерывную) и экспериментальные функции (задаваемые на дискретном множестве значений). Для этого воспользуемся умножением непрерывной функции на функцию, которая называется гребень Дирака [5].
- 3) Описание поведения характерной функции в виде нечетких условий вида «При малых  $x$  функция медленно возрастает», «При больших  $x$  функция убывает» и т.п. Такие условия описываются нечеткими отношениями - матрицами с внешней строкой и столбцом, которые содержат значения функции в двух соседних точках; внутри самой матрицы стоят числа, характеризующие степени принадлежности, с которыми соответствующие значения в соседних точках удовлетворяют нечеткому условию [6]. Каждое такое нечеткое отношение соответствует одному из условий. Системе условий соответствует некоторая  $t$  - конорма таких нечетких отношений.
- 4) Степень принадлежности конкретной эмпирической функции нечеткому условию вычисляется как  $t$  - норма значений принадлежности  $x$  к классам «малый», «средний», «большой» и нечеткого отношения, описывающего поведение функции. Степень принадлежности к классу, описываемому системой нечетких условий, определяется как  $t$  - конорма вычисленных выше принадлежностей.

В докладе обсуждаются особенности реализации алгоритма и приводится пример его работы.

В докладе также обсуждается обобщение задачи на случай нескольких классов, описываемых своими характерными функциями.

## Список литературы

- [1] “Что такое жизненный цикл продукта.”, *Информационный журнал о продвижении бизнеса ReklamaPlanet.*, <https://reklamaplanet.ru/marketing/zhiznennyj-tsikl-tovara>.
- [2] Глазьев С.Ю., “Теория долгосрочного технико-экономического развития”, 1993, 310.
- [3] “Динамика смертности. Кривые выживания.”, <https://www.yaklass.by/p/biologiya/11-klass/vid-i-populiaciia-5995/dinamika-populiacii-5943/re-ced772b2-fa42-4ad8-9624-6277c8e50632>.
- [4] “Сахарный диабет - биохимическое заболевание”, <https://biokhimija.ru/gormony/sakharnyj-diabet.html?start=1>.
- [5] Ястребов И.П., “Дискретизация непрерывных сигналов во времени. Теорема Котельникова.”, <http://www.lib.unn.ru/students/src/diskretiz.pdf>.
- [6] Рыжов А.П., “Об агрегировании информации в нечетких иерархических системах.”, *Интеллектуальные системы. Т. 6, Вып. 1–4*, 2001, 341–364, <http://www.intsys.msu.ru/staff/ryzhov/agregation.pdf>.

### Qualitative comparison of families of real functions

Ryfov A.P., Sinko A.K.

The report considers the problem of classifying the behavior of complex systems based on a comparison of a characteristic function presented by an expert and a function derived from data. Such situations are typical for economics, sociology, biology, and other fields. To solve the problem, a characteristic function is described in the form of a system of fuzzy conditions describing its behavior, and an algorithm is proposed for calculating the degree of compliance of an empirical function with such a system of fuzzy conditions.

## References

- [1] “What is the product lifecycle.”, *Information magazine about business promotion ReklamaPlanet.* (In Russian), <https://reklamaplanet.ru/marketing/zhiznennyj-tsikl-tovara>.
- [2] Glazyev S.Y., “Theory of long-term technical and economic development”, 1993, 310 (In Russian).
- [3] “The dynamics of mortality. Survival curves.” (In Russian), <https://www.yaklass.by/p/biologiya/11-klass/vid-i-populiaciia-5995/dinamika-populiacii-5943/re-ced772b2-fa42-4ad8-9624-6277c8e50632>.
- [4] “Diabetes mellitus is a biochemical disease” (In Russian), <https://biokhimija.ru/gormony/sakharnyj-diabet.html?start=1>.
- [5] Yastrebov I.P., “Sampling of continuous signals in time. Kotelnikov’s theorem.” (In Russian), <http://www.lib.unn.ru/students/src/diskretiz.pdf>.
- [6] Alexander Ryfov, “On aggregation of information in fuzzy hierarchical systems.”, *Intelligent systems. T. 6, Rel. 1–4*, 2001, 341–364 (In Russian), <http://www.intsys.msu.ru/staff/ryzhov/agregation.pdf>.

# Применение топологически простых колец в криптографии

В. В. Тензина<sup>1</sup>

В работе предлагается криптографическая схема шифрования на основе топологически простых коммутативным колец. Доказывается, что кольцо целых чисел топологически просто и на основе этого факта строится конкретная криптосхема.

**Ключевые слова:** топологически простое кольцо, топологически неприводимый модуль, криптографическая схема.

Везде считаем, что модули левые, топологические кольца и модули отделимые.

## Топологическая простота кольца целых чисел относительно некоторой топологии

Кольцо без собственных замкнутых идеалов называется *топологически простым кольцом*.

В четвертом издании Днестровской тетради (см. [1], 1.10.), в которой изложены нерешённые проблемы теории колец и модулей, В.И. Арнаутыным сформулирован следующий вопрос: существует ли в кольце целых чисел  $\mathbb{Z}$  такая неослабляемая топология, в которой  $\mathbb{Z}$  не содержит замкнутых идеалов. В данной работе даётся положительный ответ на этот вопрос.

В статье [2] строится неидеальная недискретная топология на кольце целых чисел. Дополнительно показывается, что можно построить несчётное число топологий такого типа. Такого типа топологии являются индуктивными, в дальнейшем для различных классов колец они рассматриваются в [3]. Мутылин в своей работе [4], используя похожую технику, строит кольцевую топологию на поле рациональных чисел. На основе этой топологии можно построить желаемую топологию, тем самым доказав

**Теорема 1.** *В кольце целых чисел  $\mathbb{Z}$  существует кольцевая топология, относительно которой  $\mathbb{Z}$  топологически просто.*

**Следствие 1.** *В кольце гауссовых чисел  $\mathbb{Z}[i]$  существует такая топология, относительно которой  $\mathbb{Z}[i]$  топологически просто.*

<sup>1</sup>Тензина Виктория Васильевна — в.н.с. каф. теоретической информатики мех.-мат. ф-та МГУ, e-mail: viktoria.tenzina@math.msu.ru

Tenzina Viktoria Vasil'evna — PhD, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Mechanics and Mathematics.

# Криптосхема на основе топологически простых коммутативных колец

Пусть  $R$  — топологически простое коммутативное кольцо с единицей. Например, кольцо целых чисел с индуктивной топологией. Выбираем в  $R$  конечное подмножество  $\{x_i\}_{i=1}^N = X$ . Это множество всех возможных сообщений, которые могут быть переданы и зашифрованы.

Для формирования параметров, отвечающих за шифрование и дешифрование, нам понадобится произвольный ненулевой элемент кольца  $a \in R$  и произвольная окрестность нуля  $V_1$  из  $R$  такая, что для любых различных элементов  $x, y \in X$  подмножества  $(x + V_1)$  и  $(y + V_1)$  не пересекаются. Существование такой окрестности следует из отделимости кольца и конечности множества  $X$ .

Стандартное обозначение того, что  $V_1$  является окрестностью нуля:  $V_1 \in \tau(R)$ . Найдётся окрестность  $V_2 \in \tau(R) : V_2 + V_2 \subset V_1$ . В силу конечности  $X$  существует окрестность  $V_3 \in \tau(R)$  такая, что  $V_3x \subset V_2$  для любого  $x \in X$ .

Из-за того, что коммутативное кольцо  $R$  топологически просто и содержит единицу, найдётся элемент кольца  $b$  такой, что  $ba \in 1 + V_3$ . Пусть окрестность  $V \in \tau(R)$  такова, что  $bV \in V_2$ .

Ключ шифрования  $(a, V)$ , ключ для расшифровки  $(b, V_1)$ .

Само **шифрование** устроено следующим образом. Пусть  $x \in X$ . Передаём  $y = ax + v$ , выбирая произвольный элемент  $v$  из  $V$ . Элемент  $v$  для данного  $x$  нестрого определен. В принципе  $v$  из  $V$  можно выбрать любым, принимая во внимание какие-то соображения. Например, чтобы передаваемые  $y$  были как можно более равновероятны.

**Расшифровка:** ищем  $x$  такое, чтобы  $by \in x + V_1$ . Оно такое единственное, так как

$$by = b(ax + v) = bax + bv \in (1 + V_3)x + bV \subseteq x + V_2 + V_2 \subset x + V_1.$$

Рассмотрим следующий **пример**. Пусть  $R = \mathbb{Z}$  с индуктивной топологией  $\tau(R) = \{U_n\}_{n=1}^\infty$ . Пусть выбраны простые числа  $\{p_i\}_{i=1}^\infty$  и натуральные  $\{a_{ij}\}_{i \geq j \geq 1}$  так, что

$$p_1 < a_{11} < p_2 < a_{22} < a_{21} < p_3 < a_{33} < a_{32} < a_{31} < \\ < p_4 < a_{44} < a_{43} < a_{42} < a_{41} < \dots$$

и подмножества  $U_n = \{\sum_{k=n}^\infty t_k p_k : |t_k| \leq a_{kn}\}$  являются базой окрестностей нуля для некоторой топологии.

Такая топология существует (см. выше) и относительно неё  $\mathbb{Z}$  топологически просто. Заметим, что наборы  $\{a_{ij}\}$  и  $\{p_i\}$  могут быть различны и секретны.

Выбираем конечное множество  $X$ , например,  $\{cs\}_{s=1}^N$ , где  $c \in \mathbb{N}$ .

Фиксируем  $a \in \mathbb{Z}$ . Нам надо подобрать такое  $n$ , чтобы  $U_n$  можно было использовать в качестве  $V_1$ . Затем находим  $V_1$ ,  $b$  и  $V$  по вышеописанному алгоритму.

Оценка сложности преобразований требует дальнейшего изучения. Эта сложность будет зависеть от конкретной выбранной топологии. Уже есть проблемы, чтобы конструктивно определить изначальную окрестность  $V_1$  по множеству  $X$ , а при декодировании уметь определять какому подмножеству  $\{x + V_1\}_{i=1}^N$  принадлежит  $by$ . Некоторые шаги построения  $V$  по  $V_1$  понятны. Например, для вышеописанной индуктивной топологии в кольце целых чисел окрестность  $V_2$  по  $V_1$  определяется из соотношения  $U_{n+1} + U_{n+1} \subseteq U_n$ . Нужно более тщательное теоретическое исследование самой топологии. То что окрестности вообще-то содержат бесконечное число элементов, можно обойти, придя к конечным подмножествам, учитывая индуктивность построения самой базы вышеуказанной топологии.

Из окрестностей в самом кодировании и декодировании используются только  $V_1$  и  $V$ . Фактически сама топология, топологическая простота  $R$  нам позволяет просто найти подходящие два конечных подмножества  $V_1$  и  $V$ .

На самом деле сама идея такого шифрования чем-то похожа на криптосистемы, основанные на помехоустойчивых кодах. Например крипто-схема McEliece (см. [5]). То, что там некоторые определённые биты можно изменить на что угодно, похоже на прибавление элемента из заданной окрестности.

Какую-то подобную схему хотелось бы рассмотреть на основе топологически неприводимых модулей (в качестве  $X$  рассматриваем подмножество модуля). По крайней мере топология на топологически неприводимом модуле  $\mathbb{Z}$  над дискретным кольцом  $\mathbb{Z}$  (см. [6]) проще устроена (используется идея иррациональной обмотки тора). На самом деле при построении криптосхемы вместо коммутативного топологически простого кольца можно использовать коммутативное кольцо с единицей, являющееся топологически неприводимым модулем над собой как над дискретным кольцом.

Важно уметь на более менее понятных множествах эффективно вычислять: принадлежит ли заданный элемент данной окрестности, параметризуемой несколькими секретными параметрами? Например, окрестность кольца целых чисел, являющегося топологически неприводимым модулем, параметризуется маленьким  $\varepsilon > 0$  (определяет интервал) и иррациональным числом (можно взять корень из натурального).

Дополнительно следует изучить возможности данной асимметричной схемы шифрования как криптосхемы с открытым ключом.

Рассмотрение таких схем стимулирует дальнейшее изучение свойств топологически неприводимых модулей, топологически простых колец и конструктивное построение топологий.

## Список литературы

- [1] Сост. В.Т. Филиппов, В.К. Харченко, И.П. Шестаков, “Днестровская тетрадь. Нерешённые проблемы теории колец и модулей., 4-ое изд.”, 1993, 73 pp.
- [2] Hinrichs Lowell A., “Integer topologies”, *Proc. of the A.M.S.*, **15**:6 (1964), 991-995
- [3] J.O. Kiltinen, “Inductive ring topologies”, *Trans. Amer. Math. Soc.*, **134** (1968), 149-169
- [4] Мутылин А. Ф., “Пример нетривиальной топологизации поля рациональных чисел. Полные локально ограниченные поля”, *Изв. АН СССР. Сер. матем.*, **30**:4 (1966), 873-890
- [5] R. J. McEliece, “A Public-Key Cryptosystem Based On Algebraic Coding Theory”, 1978, 42-44
- [6] С.Т. Главацкий, А.В. Михалев, В.В. Тензина, “Топологический радикал Джекобсона колец, часть II”, *Фундамент. и прикл. матем.*, **17**:1 (2011), 53-64

### Cryptography based on topologically simple rings Tenzina V.V.

The paper proves that the ring of integers is topologically simple with respect to a certain ring topology. Then we construct a cryptosystem based on commutative topologically simple rings.

*Keywords:* topologically simple ring, topologically irreducible module, cryptosystem

## References

- [1] V. T. Filippov (ed.), V. K.Kharchenko (ed.), I. P. Shestakov (ed.), “The Dniester notebook. Unsolved problems in the theory of rings and modules. 4th ed.”, 1993 (In Russian), 73 pp.
- [2] Hinrichs Lowell A., “Integer topologies”, *Proc. of the A.M.S.*, **15**:6 (1964), 991-995

- [3] J.O. Kiltinen, “Inductive ring topologies”, *Trans. Amer. Math. Soc.*, **134** (1968), 149-169
- [4] Mutylin A. F., “An example of a nontrivial topologization of the field of rational numbers. Complete locally bounded fields”, *Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Mat.*, **30**:4 (1966), 873-890 (In Russian)
- [5] R. J. McEliece, “A Public-Key Cryptosystem Based On Algebraic Coding Theory”, 1978, 42-44
- [6] S. T. Glavatsky, A. V. Mikhalev, V. V. Tenzina, “The topological Jacobson radical of rings. II.”, *Fundam. Prikl. Mat.*, **17**:1 (2011), 53-64 (In Russian)



# Информатика, компьютер, сложность вычислений

В. Н. Чубариков<sup>1</sup>

В работе обсуждаются актуальные проблемы информатики в целом и теории сложности вычислений в частности.

**Ключевые слова:** информатика, сложность вычислений, быстрое умножение

## 1. Программирование — основа информатики

Первый вопрос, который нам следует обсудить — “Что такое информатика?” Сказать, что “информатика” — это “компьютер-сайенс”, что означает только отражение ее предмета, который является техническим устройством: вычислительной машиной, компьютером. Р. В. Хэмминг писал: “Мы называем наш предмет “информатикой”, но мне кажется, что точнее было бы назвать его “компьютерной инженерией” (computer engineering), если бы не существовало вероятности неправильного толкования такого названия. Большею частью мы не подвергаем сомнению возможность существования **монитора, алгоритма, планировщика или компилятора**, скорее мы занимаемся поиском **практически работоспособного технического решения с разумными затратами времени и усилий**” ([1]).

Технический аспект здесь выступает на первое место в связи с тем, что большинство трудностей относится не к теоретическому обоснованию сделать что-то, а к практическому — каким образом это можно сделать проще и лучше.

Поэтому преподавание предмета “информатика” будет более эффективным, если в учебных планах дисциплина “программирование” будет предполагать в первую очередь практикум по программированию и не только, но и компьютерный практикум по разделам специализации, например, для учителей средней школы — компьютерный практикум по геометрии и по алгебре и началам анализа, и отводить для этого следует целый день занятий. Больше практических занятий! И в этом отличие в преподавании математики от преподавания информатики.

Чему учить? Первым выделим здесь языки и системы программирования, которые не являются прикладной составляющей обучения, и, сле-

---

<sup>1</sup> Чубариков Владимир Николаевич — заведующий кафедрой МКМА мех.-мат. ф-та МГУ, e-mail: chubarik2020@mail.ru.

Chubarikov Vladimir Nikolaevich — head of MCMA chair, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Mechanics and Mathematics

довательно, этому должен учить специалист по информатике. Заметим, что часто обучение ограничивается учебником грамматики и словарем (глоссарием) языка программирования. Но как полезно видеть и изучать, перенимать опыт подготовки добротных работающих программ. Следующий шаг — работа с базами данных требует уже участия специалистов, для которых интересна обработка этих данных. Здесь уже важна роль алгоритма и специальных законов конкретных наук, как социальных, гуманитарных, так и естественных. Заметим, что компьютер в настоящее время не обладает другими интеллектуальными возможностями кроме тех, которые присущи “цифровому вычислению”. Тем не менее, в настоящий момент мы воспользуемся не все возможности компьютера как мощного инструмента управления и преобразования информации.

Наиболее содержательной частью информатики, являющейся предметом изучения и математики, являются численные методы. Поэтому этот материал в основном и представляется как теоретический, не подготовленный к практическому применению, в связи с недостаточной проработкой фундаментальных идей для решения задач. Зачастую, используя численные методы, компьютер позволяет нам разобрать достаточное множество частных примеров, чтобы выделить “модельные ситуации” того или иного явления, и даже если не удастся сформулировать фундаментальных законов, но дает продвижение в познании явления. При этом нам приходится при составлении программ и планировании научной работы соотносить соотношения между временем работы и памятью компьютера, между последовательными и параллельными вычислениями, между цифровыми и аналоговыми схемами и др.

Первоначальным понятием в информатике является понятие **алгоритма**. Оно определяется описательным образом словами разговорного языка. Алгоритм — точное предписание, которое задает вычислительный процесс (называемый алгоритмическим), начинающийся с некоторого исходного данного (совокупности возможных исходных данных) и направленный на получение результата, определяемого этим исходным данным. Под сложностью вычислений алгоритма понимают числовую функцию, оценивающую трудность применения алгоритма к исходным данным (время работы, число тактов работы при преобразовании исходных данных в заключительные и др.)

## 2. Модели вычислительных систем, компьютеры, языки программирования

Начнем изложение с определения машины Тьюринга (the Turing machine, 1936) — абстрактного вычислительного устройства, формально уточня-

ющего интуитивное понятие **алгоритма**. Она состоит из ленты, головки и управляющего устройства. Лента разделена на клетки и бесконечна влево и вправо. В каждой клетке ленты может быть записан только один символ из ленточного алфавита  $A_0 = \{a_0, a_1, \dots, a_k\}$ , где  $a_0$  — пустой символ. Головка машины может двигаться по ленте, перемещаясь из клетки в соседнюю клетку, читать символ, записанный в клетке, и записывать в обозреваемую клетку любой символ из  $A_0$ . Управляющее устройство перемещает головку по ленте и записывает символы в клетки. Оно может находиться в одном из состояний  $q_0, q_1, \dots, q_m$ . Изменение положения головки и символов происходит по некоторой программе, состоящей из простейших команд.

Работа машины Тьюринга происходит в дискретном времени, начинается с исходных данных и завершается при достижении заключительного состояния (при некоторых исходных данных работа машины Тьюринга может и не заканчиваться). Кроме того, что машина Тьюринга дает точное определение вычислительного процесса, — алгоритма, она обладает наглядной реализацией алгоритмического процесса. Отметим, что машина Тьюринга является теоретической основой построения ЭВМ. Таким образом, любая машина Тьюринга с ленточным алфавитом производит алгоритмическое преобразование слов в этом алфавите.

**Тезис Тьюринга.** *Всякое реализуемое алгоритмическое преобразование можно выполнить подходящей машиной Тьюринга.*

### 3. Системы искусственного интеллекта

Специалист по информатике воспринимает свою главную функцию как обеспечение программ и ЭВМ для использования в старых и новых методиках обучения, но на нем лежит более сложная задача — выработка и распространение самого процесса обучения. Отправная точка зрения (М. Минский, С. Пайперт, 1969) этого мнения следующая.

1. Обучение языку программирования (хотя бы одному), работа со словарем этого языка.

2. Помочь людям строить в своем сознании различные виды вычислительных моделей.

3. Учитель должен иметь разумную модель того, что представляет собой сознание учащегося.

4. При отладке своих собственных моделей и процедур учащийся должен иметь модель того, что он делает и что он знает хорошие приемы отладки и простые, но решающие тестовые примеры.

5. Стремление учащегося при отладке программ узнать что-нибудь новое о вычислительных моделях и программировании в отличие от беспомощности представления о невозможности познать это.

Другими словами, учитель должен разрабатывать эффективные методы компьютерного моделирования процессов мышления, т.е. в определенном смысле работая с искусственным интеллектом.

Остановимся на универсальном решателе задач Ньюэлла и его коллег (General Problem Solver (GPS), 1957), исходной идеей которого являлось представление задач из некоторого класса как задач преобразования одного выражения в другое при помощи множества допустимых правил или, более общо, преобразованием одного состояния в другое. Добавим к этому использование общего механизма целенаправленного поиска для всех типов задач при изменении только конкретных знаний фактов и правил (базисные примеры логических формул).

Систематизацию и разработку решателя задач по элементарной алгебре и математическому анализу провел А. С. Подколзин ([2]). Он выделил три подхода компьютерного моделирования процессов решения задач.

Первый — древовидная классификация типов поддающихся алгоритмизации задач в соответствующей области и создание библиотеки процедур их решения (компьютерная алгебра, 1966).

Второй — основан на применении баз знаний, образованных аксиомами и теоремами некоторой предметной области (формальные языки, математическая логика, 1961).

Третий — использование базы алгоритмов локального планирования действий, накапливаемом при интерактивном обучении компьютерной системы, моделирующей процессы решения задач (решатель задач А. С. Подколзина, технология обучения, языки программирования, т.е. приемы решения задач).

## 4. Что такое TEX и LATEX?

Система компьютерной верстки, построенная на базе языка полиграфического оформления документов “TeX”, была создана Д.Кнутом (1979). Сила “TeX”а в упрощении работы пользователя и фактическом освобождении его необходимости программирования при верстке документов ([3]). Л.Лампорт (1984) представил систему “LaTeX” ([4]). Существенным развитием ее стал “LaTeX2 $\epsilon$ ” (1994) с наборами пакетов расширений таких, как *beamer* — оформление презентаций, *AmS-TeX* — ввод математических формул, *XyMTeX* — ввод химических формул, *xypic* — построение диаграмм и т.п. ([5, 6]). Система “LaTeX2 $\epsilon$ ” нетребовательна к технике, не зависит ни от архитектуры компьютера, ни от установленной на нем операционной системы.

## 5. Сложность вычислений

Элементарной операцией назовем сумму или произведение двух цифр в двоичной системе счисления. Количество элементарных операций для сложения двух  $n$ -разрядных чисел есть  $O(n)$ , а для умножения в столбик —  $O(n^2)$ . А. Н. Колмогоров поставил задачу, что в этом смысле операция умножения сложнее сложения. Эта задача не решена до сих пор. Интуиция подсказывала А. Н. Колмогорову, что  $n^2$  является оценкой снизу для количества элементарных операций. А. А. Карацуба опроверг это предположение.

Рассмотрим алгоритм А.А.Карацубы умножения многоразрядных ( $n$ -разрядных) чисел в двоичной системе счисления ([7]). Как известно обычный способ умножения чисел в столбик требует порядка  $n^2$  элементарных “цифровых” операций. В алгоритме Карацубы достаточно использовать  $n^{\log_2 3} \simeq n^{1.5}$  элементарных операций. Пусть перемножаются  $A$  и  $B$  — два  $2n$ -разрядных числа. Представим их в виде

$$A = 2^n A_1 + A_2, \quad B = 2^n B_1 + B_2,$$

где  $A_1, A_2, B_1, B_2$  —  $n$ -разрядные числа. Имеем

$$AB = (2^{2n} - 2^n) A_1 B_1 + 2^n (A_1 + A_2)(B_1 + B_2) - (2^n - 1) A_2 B_2.$$

Следовательно, умножение  $2n$ -разрядных чисел сводится к умножению трех  $n$ -разрядных или  $n + 1$ -разрядных чисел и нескольким операциям сложения и вычитания и сдвига чисел на не более  $2n$  разрядов.

Если обозначить  $M(n)$  количество элементарных операций для умножения двух  $n$ -разрядных чисел, то отсюда находим соотношение

$$M(2n) \leq 3M(n) + Cn,$$

где  $C > 0$  — некоторая постоянная.

Следствием этого неравенства является оценка  $M(n) \leq cn^{\log_2 3}$ , где  $c > 0$ . В настоящее время Шенхаге и Штрассен построили алгоритм перемножения двух  $n$ -разрядных чисел с оценкой  $M(n) \leq c_0 n \ln n \ln \ln n$ , где  $c_0 > c > 0$  — некоторые постоянные.

Алгоритм умножения двух квадратных матриц порядка  $n$  (умножение строки на столбец) требует примерно  $n^2(2n-1)$  арифметических операций над элементами матриц. В. Штрассен (1970) предложил алгоритм умножения матриц за  $O(n^{\log_2 7})$ ,  $\log_2 7 \simeq 2.807$ . Пусть  $AB = C$  — произведение двух матриц порядка  $2k$ . Тогда представим матрицы  $A, B, C$  в виде

$$A = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{pmatrix},$$

где  $A_{ij}, B_{ij}, C_{ij}, 1 \leq i, j \leq 2$  — матрицы порядка  $k$ .

Имеем

$$\begin{aligned}C_{11} &= D_1 + D_4 - D_5 + D_7, \\C_{12} &= D_3 + D_5, \\C_{21} &= D_2 + D_4, \\C_{22} &= D_1 + D_3 - D_2 + D_6,\end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}D_1 &= (A_{11} + A_{22})(B_{11} + B_{22}), \\D_2 &= (A_{21} + A_{22})B_{11}, \\D_3 &= A_{11}(B_{12} - B_{22}), \\D_4 &= A_{22}(-B_{11} + B_{21}), \\D_5 &= (A_{11} + A_{12})B_{22}, \\D_6 &= (-A_{11} + A_{21})(B_{11} + B_{12}), \\D_7 &= (A_{12} - A_{22})(B_{21} + B_{22}).\end{aligned}$$

Пусть  $L(n)$  — число арифметических операций над элементами матриц в алгоритме Штрассена. Тогда из предыдущих соотношений находим

$$L(2n) \leq 7L(n) + O(n^2).$$

Откуда следует, что  $L(n) = O(n^{\log_2 7})$ ,  $\log_2 7 = 2.7807\dots$

Д.Копшермит и С.Виноград (1990) уточнили этот до  $O(n^{2.37})$ .

## 6. Поиск литературы по информатике

Приведем классификационную схему журнала ACM “Computing Reviews”.

С. Принципы построения компьютерных систем (архитектура процессоров, реализация компьютерных систем).

Д. Программное обеспечение (методы программирования, разработка программного обеспечения, языки программирования, операционные системы).

Ф. Теория вычислений (вычисления посредством абстрактных устройств, анализ алгоритмов и сложность задач, логика и значение программ, математическая логика и формальные языки).

Г. Математические вопросы теории вычислений (численный анализ, дискретная математика, теория вероятностей и математическая статистика).

Н. Информационные системы (управление базами данных, хранение и поиск информации).

И. Методы вычислений (алгебраические манипуляции, искусственный интеллект).

Ж. Применения компьютеров (физические науки и инженерное дело).

К. Компьютеры и общество (история автоматизированных вычислений, компьютеры и образование, управление вычислительными и информационными системами, профессия программиста).

## Список литературы

- [1] Хэмминг Р. В., “Одна из точек зрения на информатику”, *Лекции лауреатов премии Тьюринга: пер. англ.*, Мир, М., 1993, 240–254.
- [2] Подколзин А. С., “О формировании приемов решения математических задач”, *Интеллектуальные системы*, **3:3–4** (1998), 51–74.
- [3] Кнут Д. Е., *Всё про TeX*, РДTeX, Протвино, 1993, 576 с.
- [4] Львовский С. М., *Набор и вёрстка в системе LaTeX*, 3-е изд., испр. и доп., МЦНМО, М., 2003, 448 с.
- [5] Есаян А. Р., Чубариков В. Н., Добровольский Н. М., Якушин А. В., *Подготовка документов в LaTeX2ε*, Уч.пос., Изд-во Тул. гос. пед. ун-та им. Л. Н. Толстого, Тула, 2013, 390 с.
- [6] Есаян А. Р., Чубариков В. Н., Добровольский Н. М., Якушин А. В., *Построение графиков средствами LaTeX-пакета pgfplots*, Уч.пос., Изд-во Тул. гос. пед. ун-та им. Л. Н. Толстого, Тула, 2015, 372 с.
- [7] Карацуба А. А., Офман Ю. П., “Умножение многозначных чисел на автоматах”, *Доклады АН СССР*, **145:2** (1962), 293–294.

## Computer science, computer and computational complexity Chubarikov V.N.

We discuss the problems of computer science and focus on computational complexity.

**Keywords:** computer science, computational complexity, fast multiplication

## References

- [1] Hamming R. W., “One Man’s View of Computer Science”, *Journal of the ACM*, **16:1** (1968), 1–12.
- [2] Podkolzin A.S., “Forming techniques for solving mathematical problems”, *Intelligent Systems*, **3:3–4** (1998), 51–74 (In Russian).
- [3] Knuth D. E., *The TeXbook*, Addison-Wesley, 1986, 483 pp.
- [4] Lvovskiy S.M., *Typesetting and layout in the LaTeX system*, 3rd eddition, MCCME, M., 2003 (In Russian), 448 pp.
- [5] Esayan A.R., Chubarikov V.M., Dobrovolskiy N.M., Yakushin A.V., *Typesetting in LaTeX2ε*, Tula State Pedagogical University Publishers, Tula, 2013 (In Russian), 390 pp.
- [6] Esayan A.R., Chubarikov V. M., Dobrovolskiy N. M., Yakushin A. V., *Plotting using LaTeX package pgfplots*, Tula State Pedagogical University Publishers, Tula, 2015 (In Russian), 372 pp.

- [7] Karatsuba A. A., Ofman Yu. P., “Multiplication of many-digital numbers by automatic computers”, *Doklady Akademii Nauk SSSR*, **145**:2 (1962), 293–294 (In Russian)



# Реализация модифицированного метода Рабинера для множества стохастических матриц на нейронных сумматорах

С. В. Шалагин<sup>1</sup>, А. Р. Нурутдинова<sup>2</sup>

Предложена реализация модифицированного метода Рабинера (ММР) для вычисления максимальной вероятности генерирования марковской последовательности заданной длины на основе одной из множества стохастических матриц, принадлежащих классу эргодических (ЭСМ). Реализация производится при использовании однотипных элементов — нейронных сумматоров (НС). Получены оценки сложности реализации ММР по количеству НС и запоминающих элементов как функции от мощности множества ЭСМ и их размерности.

**Ключевые слова:** метод Рабинера, стохастические матрицы, нейронные сумматоры, оценки сложности.

Задача вычисления максимальной вероятности генерирования марковской последовательности длины  $N$  на основе множества из  $q$  ЭСМ размерности  $m$  на  $m$  согласно ММР ставится следующим образом. Заданы последовательность  $S_N = S(1), \dots, S(N)$  и множество ЭСМ  $P_1, \dots, P_q$ , размерности  $m \times m$ . При этом  $S(t) \in S$ , где  $S$  — множество состояний марковской последовательности,  $|S| = m$ . Вероятность того, что  $S_N$  сгенерирована на основе одной из  $q$  автоматных марковских моделей, задаваемых тройкой  $(S, P_k, \pi_0^{(k)})$ ,  $k = \overline{1, q}$ , вычисляется при использовании ММР для каждой из  $q$  матриц [1, 2]. Процесс получения множества  $q$  значений вероятностей для заданной  $S_N$  на основе указанного множества ЭСМ при использовании ММР обозначим как ММР( $P_1, \dots, P_q$ ).

**Замечание.** Задача поиска максимального значения среди  $q$  элементов является известной [3, P. 207–219] и в данной работе не рассматривается.

Реализация ММР( $P_1, \dots, P_q$ ) производится, как и в классическом методе Рабинера, в три этапа: инициализация, индукция и сложение [4].

На этапе 1 (инициализация) в каждый из  $q$  регистров заносится предельный вектор  $\pi_0^{(k)} = (\pi_0^{(k)}(1), \dots, \pi_0^{(k)}(m))$ , соответствующий

---

<sup>1</sup> Шалагин Сергей Викторович — профессор КНИТУ-КАИ, e-mail: sshalagin@mail.ru.

Shalagin Sergey Viktorovich — professor, KNRTU-KAI

<sup>2</sup> Нурутдинова Алсу Рафаиловна — доцент КФУ, e-mail: nurutdinovaar@mail.ru.

Nurutdinova Alsu Rafailovna — associate professor, KFU

$P_k \left( p_{ij}^{(k)} \right)$ ,  $k = \overline{1, q}$ . Каждый из регистров включает в себя  $q$  групп по  $m$  запоминающих элементов (ЗЭ). Каждая группа ЗЭ сохраняет вектор распределения значений вероятностей перехода  $S_N$  в каждое из  $m$  состояний на  $(t + 1)$ -м шаге при условии, что  $S_N$  порождается  $P_k$ ,  $k = \overline{1, q}$ , равный  $\alpha_t^{(k)} = \left( \alpha_t^{(k)}(1), \dots, \alpha_t^{(k)}(m) \right)$ .

На этапе 2 (индукция) требуется выполнить  $N$  подэтапов. Различают последовательный и конвейерный способы выполнения подэтапов этапа 2, которые обозначим как способы 1 и 2. Способ 1 предполагает наличие  $q$  множеств по  $m$  НС, а также  $q$  групп по  $m$  ЗЭ. Каждый из НС осуществляет операцию вида

$$Z_j^{(k,t)} \left( \sum_{i=1}^m w_i^{(k)} x_i^{(k)} \right), \quad (1)$$

где

$$Z_j^{(k,t)}(x) = \begin{cases} x : p_k(S(t+1) = s_j) > 0 \\ 0 : p_k(S(t+1) = s_j) = 0 \end{cases},$$

$w_i^{(k)} = p_{ij}^{(k)}$ ,  $x_i^{(k,t)} = \alpha_t^{(k)}(i)$ ,  $p_k(S(t+1) = s_j)$  — вероятность того, что на  $(t + 1)$ -м шаге  $S_N$  перейдет в состояние  $s_j$ ,  $j = \overline{1, m}$ ,  $k = \overline{1, q}$ ,  $t = \overline{1, N}$ . Результаты, снимаемые с  $k$ -го множества из  $m$  НС, записываются в  $k$ -ю группу, включающую  $m$  ЗЭ,  $k = \overline{1, q}$ . Последовательность операций вида (1) выполняется  $N$  раз. Способ 2 выполнения этапа 2 предполагает наличие  $N$  ступеней конвейера, каждая из которых включает в себя  $q$  множеств по  $m$  НС. На каждой из  $t$  ступеней,  $t = \overline{1, N}$ , выполняется операция (1) с сохранением промежуточных результатов в регистр, включающий  $q$  групп по  $m$  ЗЭ.

Этап 3 (сложение) предполагает расчет вероятностей того, что  $S_N$  сгенерирована на основе одной из  $q$  автоматных марковских моделей, задаваемых  $\left( S, P_k, \pi_0^{(k)} \right)$ . Расчет выполняется при использовании  $q$  вырожденных НС, каждый из которых выполняет операцию вида

$$\sum_{i=1}^m \alpha_N^{(k)}(i), \quad k = \overline{1, q}.$$

Оценим сложность реализации  $\text{ММР}(P_1, \dots, P_q)$ .

Этапы 1 и 3 требуют наличия  $q$  групп из  $m$  ЗЭ и  $q$  вырожденных НС. Этап 2 при вычислении согласно способу 1 требует  $q \cdot m$  НС и  $q \cdot m$  ЗЭ. Оценки сложности вычисления  $\text{ММР}(P_1, \dots, P_q)$  по количеству НС и ЗЭ составляют  $q \cdot (m + 1)$  и  $2q \cdot m$ , соответственно, при реализации этапа 2 согласно способу 1;  $q(m \cdot N + 1)$  и  $q \cdot m(N + 1)$ , соответственно, при реализации этапа 2 согласно способу 2.

Обозначим  $t_{RG}$  — время занесения результатов в ЗЭ либо в параллельный регистр, который образуют  $q \cdot m$  ЗЭ,  $t_{HC}$ ,  $t'_{HC}$  — времена задержек вычисления результата при использовании НС общего вида и вырожденного, соответственно. Время вычисления  $\text{MMP}(P_1, \dots, P_q)$  с использованием способа 1 этапа 2 составляет  $t_{RG} + (t_{HC} + t_{RG})N + t'_{HC}$ . Время задержки ступени конвейера при выполнении  $\text{MMP}(P_1, \dots, P_q)$  с использованием способа 2 выполнения этапа 2 —  $\max(t_{RG}, t_{HC} + t_{RG}, t'_{HC})$ .

## Список литературы

- [1] Shalagin S.V, Nurutdinova A.R., “Stochastic identification of the “Object-attribute” table based on the modified Rabiner’s method”, *Journal of Physics: Conference Series*, **1925** (2021), 1–7.
- [2] Nurutdinova A.R., Shalagin S.V., “Recognition of multiple sequences by subgroups of autonomous probabilistic automata”, *Laplage em Revista*, **6:Extra-B** (2020), 160–168.
- [3] Knuth D., *The Art of Computer Programming*. V.3, Third Edition, Addison-Wesley, 1997.
- [4] Rabiner L. R., “A Tutorial on Hidden Markov Models and Selected Applications in Speech Recognition”, *Proceedings of the IEEE*, **77:2** (1989), 257–286.

## Implementation of the modified Rabiner’s method for polychastic matrices on neural adders Shalagin S.V., Nurutdinova A.R.

The implementation of the modified Rabiner’s method (MMP) is proposed for calculating the maximum probability of generating a Markov sequence of a given length based on one of the set of stochastic matrices belonging to the class of ergodic matrices (ESM). The implementation is carried out using the same type of elements — neural adders (NA). Estimates of the complexity of the implementation of the MMR by the number of NAs and storage elements as a function of the power of the set of ESMs and their dimensions are obtained.

**Keywords:** Rabiner’s method, stochastic matrices, neural adders, complexity estimates.

## References

- [1] Shalagin S.V, Nurutdinova A.R., “Stochastic identification of the “Object-attribute” table based on the modified Rabiner’s method”, *Journal of Physics: Conference Series*, **1925** (2021), 1–7.
- [2] Nurutdinova A.R., Shalagin S.V., “Recognition of multiple sequences by subgroups of autonomous probabilistic automata”, *Laplage em Revista*, **6:Extra-B** (2020), 160–168.

- [3] Knuth D., *The Art of Computer Programming*. V.3, Third Edition, Addison-Wesley, 1997.
- [4] Rabiner L. R., “A Tutorial on Hidden Markov Models and Selected Applications in Speech Recognition”, *Proceedings of the IEEE*, **77**:2 (1989), 257–286.

Часть 3.  
Интеллектуальный анализ  
больших данных

# Алгоритмы быстрого умножения

Р. Р. Айдагулов<sup>1</sup>

Здесь рассматриваются алгоритмы быстрого умножения как для больших чисел, так и для больших квадратных матриц. При умножении чисел вводится групповая алгебра, и преобразование Фурье выражается как представление элементов групповой алгебры в другом базисе, связанном с характерами. Далее вводится бигрупповая алгебра как расширение операторов групповой алгебры с использованием характеров, действующих как диагональные матрицы в стандартном базисе групповой алгебры. Аналог умножения больших чисел преобразованием Фурье распространяется на бигрупповую алгебру, т.е. на алгебру матриц.

Ключевые слова. Групповая алгебра, символы, бигрупповая алгебра, знаковые автоморфизмы, симметрии, значения.

**Ключевые слова:** кластер, алгоритм, плотность, метод осреднения.

Большие числа на компьютере представляются в  $M$  – ичной системе исчисления как значения многочлена:

$$X = x_0 + x_1M + \dots + x_{k-1}M^{k-1}.$$

$M$  есть степень двойки, обычно  $M = 2^d$ ,  $d = 32$ . Считаем, что  $0 \leq x_i < M$ . Соответственно  $X < M^k = 2^n$ ,  $n = kd$ . Пусть задано другое большое число  $Y = y_0 + \dots + y_{l-1}M^{l-1}$  и требуется найти произведение, которое не превышает  $M^m$ ,  $m = k + l$ . Произведение представляется в виде:

$$Z = XY = \sum_{i=0}^{m-1} z_i M^i, \quad z_i = \sum_{k+j=i} x_k y_j. \quad (1)$$

Правда, здесь после вычисления надо осуществить переносы, когда цифры становятся не меньше  $M$ . Для этого складываем перенос из нижнего уровня и делим на  $M$ , остаток от деления будет настоящей цифрой этого уровня, а целая часть от деления пойдет в следующий уровень как перенос.

---

<sup>1</sup> Айдагулов Рустем Римович — Старший научный сотрудник. Кафедра теоретической информатики, механико-математический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы 1, Москва, 119991, Россия, a\_rust@bk.ru.

Aidagulov Rustem Rimovich — Senior Researcher. Department of Theoretical Informatics, Faculty of Mechanics and Mathematics, Moscow Lomonosov State University, Leninskiye Gory 1, Moscow, 119991, Russia, a\_rust@bk.ru.

Пусть задана конечная абелева группа  $G$  и групповая алгебра над кольцом  $K(G)$ , элементы которой являются формальными суммами:

$$a = \sum_{g \in G} a(g)g, \quad b = \sum_{g \in G} b(g)g.$$

Их произведение определяется по такой же формуле, как и в (1)

$$ab = c = \sum_g c(g)g, \quad c(g) = \sum_{g_1 g_2 = g} a(g_1)b(g_2). \quad (2)$$

Заметим, что если сопоставим элементам циклической группы  $g_i \leftrightarrow M^i$ , форма вычисления коэффициентов полностью совпадают. Для этого порядок группы должен быть не меньше  $k+l-1$ . Для вычислений удобнее, когда порядок группы разлагается на малые множители. Для умножения очень больших чисел можно использовать и не циклические группы  $G = (Z_m)^k$ . При этом появляются сложности не соответствия размеров и произведения в группе сложению степеней многочлена, которые преодолеваются с некоторой потерей эффективности.

Для эффективности вычисления коэффициентов в (2) надо сопоставить элементам группы числа из кольца коэффициентов  $\mu_k : g^i \rightarrow \theta^{ik}$ ,  $\theta \in K$  так, чтобы  $\theta^n = 1$ . Расспроstrая вычисление характера на всю групповую алгебру получим  $n$  значений для  $n$  характеров. Произведение значений сомножителей будут значениями произведения.

В дальнейшем считаем, что  $n = |G| = |G^*|$  обратим в кольце коэффициентов. Для каждого из  $n$  характеров определим средние (с весами) элементы

$$t_\mu = \frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} \mu(g)g. \quad (3)$$

Характеры можно применять и к этим  $n$  различным элементам:

$$\mu_1(t_\mu) = \frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} \mu(g)\mu_1(g)g = t_{\mu\mu_1}. \quad (4)$$

**Лемма 1.** Пусть  $G$  конечная коммутативная группа порядка  $n$ , изоморфная своей группе характеров. Тогда между характерами и элементами группы имеется соотношение:

$$\sum_{\mu \in G^*} \mu(g) = \begin{cases} |G|, & g = e, \\ 0, & g \neq e. \end{cases} \quad \sum_{g \in G} \mu(g) = \begin{cases} |G|, & \mu = e, \\ 0, & \mu \neq e. \end{cases} \quad (5)$$

Из него получаем ортогональность базиса  $t_\mu$ :

$$t_\mu t_{\mu_1} = \frac{1}{|G|^2} \sum_{g, g_1} \mu(g)\mu_1(g_1)gg_1 = \frac{1}{|G|} \sum_g \mu(g)\mu_1(g^{-1})t_{\mu_1} = \begin{cases} t_\mu, & \mu = \mu_1, \\ 0, & \mu \neq \mu_1. \end{cases} \quad (6)$$

Пусть многочлен представляется (задан) как элемент групповой алгебры  $f = \sum_g a(g)g$ . Тогда его представление в базе  $t_\mu$  имеет вид:

$$f = \sum_g a(g)g = \sum_\mu t_\mu \sum_g a(g)\mu(g^{-1}) = \sum_\mu \bar{a}(\mu)t_\mu, \quad \bar{a}_\mu = \sum_g \mu(g^{-1})a(g). \quad (7)$$

Аналогично, обратный переход

$$f = \sum_\mu \bar{a}(\mu)t_\mu = \frac{1}{n} \sum_{\mu, g} \bar{a}(\mu)\mu(g)g = \sum_g a(g)g, \quad a(g) = \frac{1}{n} \sum_\mu \bar{a}(\mu)\mu(g). \quad (8)$$

Таким образом, обратное преобразование Фурье получается вычислением значений многочлена  $\sum_\mu \bar{a}(\mu)t_\mu$  заменяя переменные  $t_\mu$  на  $\mu(g)$  и поделив результат на  $n$ .

## 1. Бигрупповая алгебра

Пусть  $G$  конечная абелева группа порядка  $n$ ,  $K$  коммутативное кольцо с единицей, где  $n$  обратимо и имеются корни из 1 соответствующей степени,  $K(G)$  групповая алгебра. Элементы групповой алгебры можно рассматривать как линейные операторы, действующее в  $V = K(G)$  через умножение. Отметим, что все эти операторы в базе  $t_\mu$  приводятся к диагональному виду  $gt_\mu = \mu^{-1}(g)t_\mu$ . Введем еще операторы-характеры, действующие диагонально в базе  $g$ :  $\mu : g \rightarrow \mu(g)g$ . Полученная алгебра операторов на  $V = K(G)$ , называемая в дальнейшем бигрупповой алгеброй группы  $G$  [1], состоит из формальных линейных сумм:

$$\sum_{\mu, g} a(\mu, g)\mu g.$$

Образующие этой алгебры  $\mu, g$  удовлетворяют коммутационным соотношениям:

$$\mu g = \mu(g)g\mu. \quad (9)$$

В дальнейшем ограничимся рассмотрением бигрупповой алгебры группы  $(\mathbb{Z}_2)^k$ , которая изоморфна алгебре матриц  $n \times n$ ,  $n = 2^k$  (для характеристики, отличной от 2). В дальнейшем базис Сильвестра бигрупповой алгебры, состоящий из  $n^2$  элементов обозначим через  $G = \{g\}$ , для сходства с первой частью (групповой алгеброй). Особым элементом базиса является единица, коммутирующая со всеми остальными. Все другие элементы базиса с половиной из остальных антикоммутируют, с другой половиной (включая себя и единицу) коммутируют. Если  $t \neq 1$  антикоммутирует с элементом  $s$ , то множества цветов  $P_0(t), P_1(t)$



коммутирующих и антикоммутирующих с элементом  $t$  связаны соотношением  $P_0(t) = P_1(t) \oplus s, P_1(t) = P_0(t) \oplus s$ . Для каждого элемента базиса Сильвестра  $t$  определим характер на элементах базиса Сильвестра  $t(g) = tgt^{-1}g^{-1}$  и значение многочлена (на элементах бигрупповой алгебры)  $t(\sum_g a(g)g) = \sum_g a(g)t(g)$ . Очевидно, что лемма 1 остается справедливой с учетом того, что сейчас  $|G| = |G^*| = n^2$ .

Определим инволюцию на элементах базиса Сильвестра и антиизоморфизм на всей бигрупповой алгебре через значения на образующих алгебры исходя из формулы:

$$I(x_i) = -x_i, I(y_i) = -y_i, I(x_i y_i) = -x_i y_i.$$

Имеется еще другой антиизоморфизм-транспонирование  $x_i^T = x_i, y_i^T = y_i, (x_i y_i)^T = y_i x_i = -x_i y_i$ . Все  $n^2 = 4^k$  цветов разделяются на 4 типа:

- 0 - (0,0)  $\{g|I(g) = g, g^T = g\}$  их количество  $4^{k-1} + y_k, y_k = \frac{2^k + (-2)^k}{4}$ .
- 1 - (0,1)  $\{g|I(g) = g, G^T = -g\}$  их количество  $4^{k-1} - 2y_k$ .
- 2 - (1,0)  $\{g|I(g) = -g, G^T = g\}$  их количество  $4^{k-1} + 2y_k$ .
- 3 - (1,1)  $\{g|I(g) = -g, G^T = -g\}$  их количество  $4^{k-1} - y_k$ .

Зная разложения множителей

$$A = \sum_{g_1} a(g_1)g_1, B = \sum_{g_2} b(g_2)g_2$$

можем определить левые и правые значения и по ним вычислить произведение  $C = \sum_g c(g)g$ .

Несмотря на то, что  $t : G \rightarrow Z_2, t(g) = tgt^{-1}g^{-1} = \pm 1$  гомоморфизм из группы цветов, мы не можем определить даже значение  $t(g) = t(g^{-1})$ , для  $g = xy = -yx = -g^{-1}, t(g_1 g_2) = t(g_1)t(g_2)$ . Поэтому произведение значений вычислим двумя способами для не единичного характера. Пусть произведения элементов  $a(g_1)b(g_2^{-1}) = c_1 g_1 g_2^{-1}, a(g_3^{-1})b(g_4) = c_2 g^{-1}$ . Нам надо правильно определить суммы разных составляющих одного цвета и привести их к единому виду. Для этого достаточно правильно определить знаки каждого произведения на каждом уровне  $g_i = (g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{ik})$ , т.е. достаточно правильно определить знаки перед  $g = g_1 g_2^{-1}$  для каждого случая  $g_1 = 1, x, y, xy; g_2 = 1, x, y, xy$ ; и правильно определить знак перехода из коэффициентов перед  $g$  к коэффициенту перед  $g^{-1}$ . Последнее верно, если менять знак только для случая  $g = xy$ . Тогда знак перед  $g = 1$  будет вычислен правильно, если знаки перед  $g$  и  $g^{-1}$  будут одинаковы. В случае, когда  $g_1 = 1$  или  $g_2 = 1$  так же знак произведения будет определен правильно. Остается рассмотреть случай, когда  $g_1$  и  $g_2$  антикоммутируют. В этом случае, из  $g_1 g_2 = g_3$  следует  $(-g_2)(-g_1) = (-g_3)$ . Таким образом, отображение  $I(g) = (I(g_1), I(g_2), \dots, I(g_k)) = (-1)^l g, I(g_i) = 1, \text{ if } g_i = 1, I(g_i) =$

$-g_i$  if  $g_i \neq 1$  является нужным антиизоморфизмом, определяющим сопряженное значение  $\bar{t}(g) = t(I(g))$  к значению  $t(g)$ .

Обозначим через  $\bar{t}(\sum_g a(g)g) = \sum_g a(g^{-1})t(g)$ . Аналогично (3) можно ввести средние

$$t_\mu = \frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} \mu(g)g, \quad \bar{t}_\mu = \frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} \mu(g)g^{-1}, \quad |G| = n^2.$$

При этом остается справедливой (4). Соотношение (6) несколько изменится:

$$t_\mu \bar{t}_{\mu_1} = \begin{cases} 1, & \mu = \mu_1 \\ 0, & \mu \neq \mu_1 \end{cases}$$

Отметим, что аналоги формул (7) и (8) так же имеются. Однако, у нас в вычислениях используются характеры парами на подобии спинорных:

$$\sum_g c(g)g = \sum_{g_1, g_2} a(g)b(g_2^{-1})g_1g_2^{-1},$$

$$t(C) = \sum_g c(g)t(g) = \left(\sum_{g_1} a(g_1)t(g_1)\right)\left(\sum_{g_2} b(g_2^{-1})t(g_2^{-1})\right) = t(A)\bar{t}(B).$$

$$\bar{t}(C) = \sum_g c(g)t(g) = \left(\sum_{g_1} a(g_1^{-1})t(g_1^{-1})\right)\left(\sum_{g_2} b(g_2)t(g_2)\right) = \bar{t}(A)t(B) = t(C^T).$$

$$c(g) = \frac{1}{|G|} \left[ 1(C) + \sum_{t \neq 1} t(g) \frac{t(C) + g^2 \bar{t}(C)}{2} \right], \quad |G| = n^2.$$

Отметим, что  $g^2 = \pm 1$  и поэтому формула вычисления коэффициента  $c(g)$  перед элементом базиса Сильвестра корректна.

Элемент  $t = \prod_i t_i$  базиса Сильвестра определяется адресом, где хранится значение коэффициента перед  $t$ . Компоненты  $t_i$ , определяются двумя битами адреса. Пусть значения битов соответствуют

$$00 - t_i = 1, \quad 01 - t_i = x_i, \quad 10 - t_i = y_i, \quad 11 - t_i = x_i y_i.$$

Так удается вычислять коэффициенты разложения в базисе Сильвестра на месте самих матриц. На самом деле можно вычислять и значения прямо на этом месте ( в массиве коэффициентов матриц) за  $O(n^2 \log n)$  операций и обратно, коэффициенты матриц по значениям произведения матриц за  $O(n^2 \log n)$  операций. При этом  $O(n^2 \log n)$  операций сложения вычитания элементов массива и примерно столько же еще более быстрых логических операций. На порядок медленных операций умножения всего  $2n^2 - 1$ .

## Список литературы

1. Айдагулов Р.Р. Бигрупповые алгебры и их автоморфизмы. В эл. журнале Дневник науки №1 2019г. (20 стр.)

### Fast multiplication algorithms

Aidagulov R.R.

Fast multiplication algorithms for both large numbers and large square matrices are considered here. When multiplying numbers, a group algebra is introduced, and the Fourier transform is expressed as a representation of the elements of the group algebra in another basis associated with characters. Next, bigroup algebra is introduced as an extension of group algebra operators using characters acting as diagonal matrices in the standard basis of group algebra. The analogue of multiplication of large numbers by the Fourier transform extends to group algebra, i.e. to the algebra of matrices.

*Keywords:* Group algebra, symbols, b and group algebra, sign automorphisms, symmetries, values.

## References

- [1] Aidagulov R.R., "Bigroup algebras and their automorphisms.", *Electronic journal "Diary of Science"*, 2019 N1. (In Russian), 20 pp.

# Бигрупповые алгебры и теорема Поттера

Р. Р. Айдагулов<sup>1</sup>

Здесь теорема Поттера для двух переменных обобщается на случай многих переменных. При этом, обобщение на степень  $n$  выглядит как определение квадрата длины в обычной Клиффордовой алгебре состоящей из линейной комбинации базисных элементов Клиффордовой алгебры. Не для всякого набора элементов, коммутирующих через множители, являющиеся примитивными корнями  $n$ -ой степени, обобщенная теорема Поттера верна. Для этого необходимо и достаточно, чтобы они образовали образующие порядка  $n$  обобщенной Клиффордовой алгебры. Бигрупповые алгебры и обобщенные алгебры Клиффорда представляют одно и то же понятие.

**Ключевые слова:** Бигрупповая алгебра, обобщенные алгебры Клиффорда, образующие Клиффорда, обобщение теоремы Поттера.

Известна теорема [1] о том, что если  $a, b$  две не коммутирующие переменные, например матрицы, для которых выполняется соотношение коммутации:

$$ba = \theta ab, \theta^n = 1, \theta^k \neq 1 \forall 0 < k < n, \quad (1)$$

то выполняется соотношение Поттера:

$$(a + b)^n = a^n + b^n. \quad (2)$$

В статье [2] имеется попытка обобщить это на много переменных:

$$(a_1 + a_2 + \dots + a_m)^n = \sum_i a_i^n, \text{ if } a_i a_j = \theta_{ij} a_j a_i$$

$$\forall i \neq j, \theta_{ij}^n = 1, \theta_{ij}^k \neq 1 \forall 0 < k < n, \quad (3)$$

Однако, такая теорема не верна уже при  $n = 3, m \geq 3$ . Она как известна, верна для  $n = 2$  в алгебрах Клиффорда при любом  $m$ , когда  $a_i$  совпадают с образующими алгебры Клиффорда с точностью до множителя из поля.

Обобщение этой теоремы дано в [3]. Для этого потребуются вводить понятие бигрупповой алгебры [4], являющейся по сути обобщенной алгеброй Клиффорда.

---

<sup>1</sup> Айдагулов Рустем Римович — Старший научный сотрудник. Кафедра теоретической информатики, механико-математический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы 1, Москва, 119991, Россия, a\_rust@bk.ru.

Aidagulov Rustem Rimovich — Senior Researcher. Department of Theoretical Informatics, Faculty of Mechanics and Mathematics, Moscow Lomonosov State University, Leninskiye Gory 1, Moscow, 119991, Russia, a\_rust@bk.ru.

Пусть  $G$  конечная абелева группа,  $G^*$  группа характеров (гомоморфизмы в мультипликативную группу поля). Бигрупповая алгебра определяется как множество формальных сумм:

$$\sum_{\mu \in G^*, g \in G} a_{\mu, g} \mu g,$$

с коммутационными соотношениями

$$\mu g = \mu(g) g \mu.$$

Такая алгебра обладает замечательными свойствами. Определим отображение бигрупповой алгебры циклической группы  $G$  в алгебру матриц. Обозначим через  $x$  и  $y$  следующие матрицы порядка  $n \times n$ :

$$x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \theta & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \theta^2 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \theta^{n-1} \end{pmatrix}, y = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Легко проверяется, что при  $\theta^n$  выполняется  $xy = \theta yx$ ,  $x^n = y^n$ . Когда группа  $G$  порядка  $n$  имеет структуру  $Z_{n_1} \oplus Z_{n_2} \oplus \dots \oplus Z_{n_k}$ ,  $n = n_1 \dots n_k$  так же получим алгебру, порожденными элементами как  $x_i, y_i$  порядков  $n_i$  и гомоморфизм в алгебру матриц порядка  $n$ . Доказано [4], что в случае, когда в поле имеются примитивные корни степени  $n_i$  и характеристика поля не делит  $n$ , то бигрупповая алгебра изоморфна алгебре матриц порядка  $n \times n$ .

Отметим, что бигрупповая алгебра не представляется групповой алгеброй группы типа  $G^* \oplus G$ . Действительно, в случае существования однородного отображения в групповую алгебру некоторой группы  $\mu g$  и  $g \mu$  представлялись бы разными элементами этой группы  $s_1, s_2$ . Так как групповая алгебра прямая сумма однородных модулей, порожденных элементами группы, соотношение  $s_1 - \theta s_2 = 0$  невозможно.

Рассмотрим бигрупповую алгебру группы  $G = (Z_n)^k$ . Она порождается образующими Дарбу:

$$x_i, i = 1, 2, \dots, 2k, \quad x_i x_{i+k} = \theta x_{i+k} x_i, \quad (x_{i+k} = y_i).$$

Различные произведения степеней

$$\prod_{l=1}^{2k} x_l^{i_l} = x^I, \quad I = (i_1, \dots, i_{2k})$$

образуют базис Сильвестра, а мультииндексы  $I = (i_1, i_2, \dots, i_{2k})$ ,  $i_l \in Z_n$  представляют группу цветов. Образующие Дарбу представляют

$$J = \begin{pmatrix} O & E_k \\ -E_k & O \end{pmatrix}$$

ортогональный базис в симплектическом пространстве группы цветов с кососимметричным скалярным произведением

$$[I, J] = \sum_{l=1}^k (i_l j_{i+k} - i_{k+l} j_l), \quad x^I x^J = \theta^{[I, J]} x^J x^I.$$

Образующими Клиффорда в такой алгебре называются такие элементы  $z_1, \dots, z_{2k}$ , что

$$z_j z_i = \theta_i z_i z_j, \quad i < j \quad (4)$$

примитивный корень  $\theta_i$  степени  $n$  от 1, один и тот же для всех  $j > i$ . По образующим Дарбу можно построить образующие Клиффорда многими способами:

$$z_1 = x_1^i, z_2 = x_{k+1}^{i_2}, z_3 = x_1^{i_3} x_{k+1}^{i_2} x_2^{i_4}, z_4 = x_1^{i_3} x_{k+1}^{i_2} x_2^{i_5} x_{2+k}^{i_6}, \dots$$

Здесь все  $i_l$  взаимно просты с  $n$  и степени вхождения  $x_i$  в  $z_j$ ,  $j \geq 2i+1$ ,  $i < k$ ,  $j \geq 2(k-i)$ ,  $i > k$  одни и те же. Взяв образующие

$$z_1 = x_1, z_2 = x_{k+1}, z_3 = x_1^{n-1} x_{k+1} x_2, z_4 = x_1^{n-1} x_{k+1} x_{2+k},$$

$$z_5 = x_1^{n-1} x_{k+1} x_2^{n-1} x_{2+k} x_3, \dots (5)$$

получим стандартные образующие Клиффорда

$$z_i z_j = \theta z_j z_i, \quad i < j.$$

Верно и обратное, если алгебра имеет  $2k$  образующих Клиффорда, то она имеет и образующие Дарбу и тем самым представляет бигрупповую алгебру группы  $G = (Z_n)^k$ . Обобщенной теоремой Поттера является утверждение:

**Теорема 1.** *Соотношение ( ) выполняется, если  $a_i$  с точностью до нумерации являются подмножеством образующих Клиффорда, с соотношениями (4) для бигрупповой алгебры  $(Z_n)^k$ ,  $k \geq [(m+1)/2]$ .*

*Доказательство.* Рассмотрим вначале случай  $m = 2$ . Пусть  $a_2 a_1 = \theta a_1 a_2$ . Определим для них квантовые биномиальные коэффициенты, определяемые рекуррентно:

$$(a_1 + a_2)^m = \sum_{i=0}^m \binom{m}{i}_\theta a_1^i a_2^{m-i}.$$

Следовательно,  $\binom{1}{0}_\theta = 1 = \binom{1}{1}_\theta$ , и

$$\binom{m}{i}_\theta = \theta^{m-i} \binom{m-1}{i-1}_\theta + \binom{m-1}{i}_\theta, i > 0, \binom{m}{0}_\theta = 1.$$

Из рекурсии получаем:

$$\binom{m}{i}_\theta = \sum_{l=1}^{m-i+1} \theta^{m-l} \binom{m-1}{i-1}_\theta.$$

Вводя обозначения  $m_\theta = 1 + \theta + \dots + \theta^{m-1} = (m-1)_\theta + \theta^{m-1}$ ,  $m!_\theta = \prod_{i=1}^m i_\theta$  получаем формулу

$$\binom{m}{i}_\theta = \frac{m!_\theta}{i!_\theta (m-i)!_\theta}.$$

Отметим, что  $m_\theta = 0 \Leftrightarrow \theta^m = 0$ , в нашем случае ( $\theta$  примитивный корень из 1) это эквивалентно  $n|m$ . При  $m < n$  ни один из биномиальных коэффициентов не равен 0, а при  $m = n$  все коэффициенты за исключением крайних равны нулю. Это доказывает случай  $m = 2$  - (2).

Когда  $m > 1$  переносим влево все  $a_1$ , соответствующее  $z_1$  в соотношении (4). Так как  $a_1$  одинаково коммутирует со всеми остальными членами получим

$$(a_1 + a_2 + \dots + a_m)^n = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i}_{\theta_1} a_1^i (a_2 + \dots + a_m)^{n-i} = (a_2 + \dots + a_m)^n + a_1^n.$$

Далее, перенося все степени  $a_2$  влево получим выражение без  $a_1, a_2$  и  $a_1^+ a_2^n$ . Продолжая процесс получим

$$(a_1 + a_2 + \dots + a_m)^n = \dots = \sum_{i=1}^{m-2} a_i^n + (a_{m-1} + a_m)^n = \sum_{i=1}^m a_i^n.$$

□

Легко устанавливается необходимость условия примитивности корней  $\theta_1$ . Сложнее показать необходимость условия (4) для справедливости теоремы. Несколько проще доказываем необходимость этого условия при  $m = 3$ . Далее, если  $m > 3$ , то среди них найдутся три, которых нельзя упорядочить так, чтобы они составляли подмножество образующих Клиффорда. Пусть это  $a_1, a_2, a_3$ , обозначим через  $b = a_1 + a_2 + a_3$  их сумму. Тогда

$$(a_1 + a_2 + \dots + a_m)^n = b^n + \sum_{i=1}^n P_i(a_1, a_2, a_3, \dots, a_m),$$

где  $P_i$  многочлены с суммарной степенью  $n - i$  по переменным  $a_1, a_2, a_3$ . Соответственно, оставшийся не нулевой член, отличный от  $a_1^n, a_2^n, a_3^n$  докажет необходимость условия (4) и для случая  $m > 3$ .

## Список литературы

- [1] R.Loewy, V.Mehrmann, “A note on Potter’s theorem for quasi commutative matrices”, *Linear algebra and its Applications*, **430** (2009), 1812–1825.
- [2] Игнатъев М.В., “Квантовая комбинаторика”, *Математическое просвещение*, **18** (2014), 66–111.
- [3] Айдагулов Р.Р., “Бигрупповые алгебры и квантовая комбинаторика”, *Эл. журнал Дневник науки*, **1** (2019), 7.
- [4] Айдагулов Р.Р., “Бигрупповые алгебры и их автоморфизмы Бигрупповые алгебры и их автоморфизмы”, *Эл. журнал Дневник науки*, **1** (2019), 20.

### Bigroup algebras and Potter’s theorem Aidagulov R.R.

Cluster analysis has a very wide range of applications; its methods are used in medicine, chemistry, archeology, marketing, geology and other disciplines. Clustering consists of grouping similar objects together, and this task is one of the fundamental tasks in the field of data mining. Usually, clustering is understood as a partition of a given set of points of a certain metric space into subsets in such a way that close points fall into one group, and distant points fall into different ones. In this paper, we offer a local averaging method for calculating the distribution density of data as points in a metric space. Choosing further sections of the set of points at a certain level of density, we get a partition into clusters. The proposed method offers a stable partitioning into clusters and is free from a number of disadvantages inherent in known clustering methods.

*Keywords:* cluster, algorithm, density, averaging method.

## References

- [1] R.Loewy, V.Mehrmann, “A note on Potter’s theorem for quasi commutative matrices”, *Linear algebra and its Applications*, **430** (2009), 1812–1825.
- [2] Ignatiev M.V., “Quantum combinatorics”, *Mathematical education*, **18** (2014), 66–111 (In Russian).
- [3] Aidagulov R.R., “Bigroup algebras and quantum combinatorics.”, *Electronic journal “Diary of Science”*, **1** (2019) (In Russian), 7 pp.



- [4] Aidagulov R.R., “Bigroup algebras and their automorphisms.”,  
*Electronic journal “Diary of Science”*, **1** (2019) (In Russian), 20 pp.

# Преподавание фундаментальных основ искусственного интеллекта как реализация концепции нового научного знания

С. Т. Главацкий<sup>1</sup>, И. Г. Бурькин<sup>2</sup>

Рассматривается современная ситуация развития общества, когда оно вплотную подошло к восприятию методов и средств искусственного интеллекта (ИИ) в повседневной жизни как к реализации принципов нового научного знания (учения), основанного на фундаменте «Науки о данных». Предложена авторская концепция построения образовательных траекторий при подготовке специалистов в сфере ИИ.

**Ключевые слова:** искусственный интеллект, высшее образование, ученый по данным, инженер по данным, аналитик данных.

## 1. Введение

В настоящее время мир достиг поворотного момента в развитии методов и средств искусственного интеллекта (ИИ), когда создаваемые технологии перешли из области теории и науки в «реальный мир», т.е. стали доступны практически всем отраслям экономики. Этот сдвиг является весьма эффективным, но, в то же время, непростым, поскольку сочетает в себе сложности применения ИИ со сложностями организации человеческой деятельности. Сегодня ни у кого не вызывает сомнений, что успехи в развитии экономики страны, в особенности, в её цифровизации, в очень большой степени связаны с внедрением технологий ИИ. В связи с этим возникает принципиально новая задача интеграции ИИ во все отрасли

---

<sup>1</sup>Главацкий Сергей Тимофеевич — доцент, Кафедра теоретической информатики, механико-математический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы 1, Москва, 119991, Россия, glavatsky\_st@mail.ru.

Glavatsky Sergey Timofeevich — Associate professor, Department of Theoretical Informatics, Faculty of Mechanics and Mathematics, Moscow Lomonosov State University, Leninskiye Gory 1, Moscow, 119991, Russia, glavatsky\_st@mail.ru.

<sup>2</sup>Бурькин Илья Геннадиевич — научный сотрудник, Кафедра теоретической информатики, механико-математический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы 1, Москва, 119991, Россия, Iia.Burykin@sdo.msu.ru.

Burykin Iia Gennadievich — Researcher, Department of Theoretical Informatics, Faculty of Mechanics and Mathematics, Moscow Lomonosov State University, Leninskiye Gory 1, Moscow, 119991, Russia, Iia.Burykin@sdo.msu.ru.

экономики, буквально во все сферы нашей жизни. Перед наукой стоит задача, решить которую в рамках какого-нибудь одного направления невозможно. Развитие и повсеместное внедрение технологий ИИ – это, цель, достижимая только серьёзными продвижениями, как в информатике и информационных технологиях, в «Науке о данных», в машинном обучении, так и в физиологии мозга, психологии, этике, философии и праве. Значимые достижения в этой области могут быть сделаны только объединенными коллективами ученых на стыке разных дисциплин. Но и это – только одна сторона проблемы. Другая же ее сторона – это нехватка готовых многопрофильных специалистов. Авторы хорошо понимают это и считают, что университетам нужно развивать научно-образовательные программы, по которым студенты будут обучаться всему, что им необходимо для дальнейшей успешной карьеры в выбранной области, а также участвовать в разработке реальных проектов (например, в студенческих конструкторских бюро). Дефицит человеческих талантов является наиболее заметным дефицитом ИИ в стране и становится самым серьезным препятствием для приобретения, создания и внедрения технологий на базе ИИ. Нужно строить новые конвейеры талантов, создать новые образовательные программы. Цифровой век требует цифрового корпуса. Не менее важно улучшать, как STEM-образование, так и систему приема и удержания высококвалифицированных кадров. Эти задачи сейчас решаются в МГУ в рамках недавно организованной научно-образовательной школы «Мозг, когнитивные системы и искусственный интеллект», объединяющей группы исследователей и преподавателей ряда факультетов и институтов университета.

## 2. Концепция преподавания основ ИИ

Авторы в своей научно-образовательной деятельности принимают смену парадигмы в построении образовательной траектории будущих специалистов в области ИИ. А именно, мы считаем, что общество вплотную подошло к восприятию методов и средств ИИ в повседневной жизни как к реализации принципов нового научного знания, базирующегося на следующем фундаменте (основы такого концептуального подхода изложены в работе [1]).

**Основа знания:** «Наука о данных» – наука о представлении данных, их хранении, передаче и анализе, как концептуальной основе моделей жизненных процессов.

**Цель знания:** осмысление и представление жизненных процессов в научной, цифровой форме, ориентированной на дальнейший анализ и управление процессами, как в природных, так и в созданных людьми системах развитыми средствами ИИ.

**Задача знания:** успешное решение различных задач человеческой деятельности методами и средствами искусственного интеллекта, базирующимися на достижениях «Науки о данных» как на фундаментальной основе.

**Носители знания:** ученые по данным, специалисты в области ИИ.

**Средства передачи знания:** высокоразвитые среды обработки данных, такие, как Python с множеством библиотек модулей, а также другие, эффективные средства обработки, представления и анализа данных.

**Сфера распространение знания:** тотальное применение во всех видах человеческой деятельности методов ИИ, повсеместное внедрение типовых решений и инструментариев. Подготовка Ученых, Инженеров и Техников, осуществляющих развитие и применение средств ИИ.

Постараемся обосновать необходимость нового концептуального восприятия в построении образовательного процесса будущих специалистов. В настоящее время принята следующая классификация специалистов, работающих в области ИИ:

- Ученые по данным (Data Scientists/AI developers);
- Инженеры по данным (Data Engineers);
- Инженеры-программисты (Software Engineers);
- Специалисты по эксплуатации и развитию (DevOps);
- Специалисты по кибербезопасности (DevSecOps);
- Менеджеры по управлению рисками / аудиторы;
- Архитекторы данных.

Даже с учетом определенной размытости границ в рамках деятельности этих специалистов можно все-таки утверждать, что, как образовательные стандарты, так и их практическая подготовка должны быть различными. Рассмотрим принципиальные особенности деятельности таких специалистов.

Ученые по данным (Data Scientists/AI developers).

Специалисты по обработке данных обычно выступают в роли действующих лиц при разработке ИИ по умолчанию. Большинство специалистов по данным занимаются как ручной аналитикой, так и аналитикой на основе ИИ, хотя ряд ученых по данным предпочитают специализироваться на ИИ. Например, конкретные дисциплины, такие, как нейронные сети, часто требуют специального опыта. Одной из причин возникновения таких специализированных должностей, как инженеры по обработке данных, советники по этике/политике и др., является то, что они позволяют ученым по данным сосредотачиваться именно на развитии новых технологий.

Инженеры по данным (Data Engineers).

Конвейеры данных лежат в основе жизненного цикла моделей производственных процессов, а инженеры по обработке данных, в свою очередь, поддерживают конвейеры данных. Поскольку эти конвейеры могут быть достаточно абстрактными и сложными, инженеры по обработке данных могут значительно повысить эффективность средств ИИ. В крупных организациях управление потоком данных, помимо управления самими производственными процессами, является ответственным участком работы.

Инженеры-программисты (Software Engineers).

Инженеры-программисты обычно не создают модели управляемых ИИ процессов, но, с другой стороны, большинство организаций разрабатывают не только такие модели, но и необходимое программное обеспечение и различные приложения. Важно, чтобы инженеры-программисты и специалисты по обработке данных работали вместе, тогда проще обеспечить эффективное функционирование систем ИИ.

Специалисты по эксплуатации и развитию (DevOps).

Команды DevOps выполняют две основные роли в жизненном цикле модели ИИ. Во-первых, они поддерживают операционные системы, а также тесты для обеспечения безопасности, производительности и доступности моделей ИИ. Во-вторых, они отвечают за управление конвейерами данных. Обе эти роли требуют тесного сотрудничества с аналитиками данных, инженерами данных и архитекторами данных.

Специалисты по кибербезопасности (DevSecOps).

Надежная техническая архитектура и политика кибербезопасности для защиты данных и приложений ИИ имеют решающее значение для долгосрочного успеха внедрения ИИ. DevSecOps, основываясь на DevOps (наборе процессов и методов, направленных на повышение эффективности взаимодействия и координации между разработчиками и операционным персоналом), расширяют сферу этих отношений, включая в нее безопасность систем и их устойчивость к преднамеренному злоумышленному вмешательству.

Менеджеры по управлению рисками / аудиторы.

В определенных отраслях (особенно в секторе финансовых услуг) функция модели управления рисками (MRM) играет решающую роль для соблюдения нормативных требований. MRM также может защитить компании от потерь, вызванных неэффективно работающими моделями ИИ.

Архитекторы данных.

Архитекторы данных играют весьма важную роль в жизненном цикле модели машинного обучения, обеспечивая масштабируемую и гибкую среду для разработки моделей. Кроме того, разработчикам средств ИИ

полезен их опыт для внедрения новых технологий для повышения эффективности их применения.

### 3. Выводы

Как мы видим, сфера применения методов и средств ИИ является многоуровневой, в каждом ее слое решаются специфические задачи. Поэтому и подготовка специалистов по ИИ должна быть выделена в самостоятельную научно-образовательную область, в фундаменте которой находится, прежде всего, «Наука о данных», наряду с примыкающими областями знаний. Реализация этой идеи в том или ином виде осуществляется в ряде ведущих университетов мира (см., например, [2]). Проблемы обучения студентов «Науке о данных» и подготовки «учёного по данным» имеют свою специфику для классических университетов, готовящих специалистов в рамках программ академического высшего образования. Рассмотрению вариантов ее решения посвящены многие работы российских и зарубежных ученых. Интересно также отметить, что, помимо устоявшихся, сформировавшихся областей, сейчас происходит разработка учебных планов непосредственно для «Науки о данных» ([3, 4]). Рассмотрев (пусть даже неполно) спектр направлений деятельности специалистов в области ИИ, мы приходим к выводу, что, несмотря на условность границ их сфер активности, необходимо в процессе обучения учитывать дальнейшую специализацию выпускников. Для различных специалистов необходимо разрабатывать различные образовательные траектории, не пытаясь готовить «универсалов» в области ИИ. Безусловно, в дальнейшем специалисты могут менять профили своей деятельности, но в процессе обучения нужно готовить специалистов различных профилей по самостоятельным образовательным программам. А предметное насыщение этих программ нужно осуществлять с учетом новой учебной парадигмы.

**Благодарности:** Исследование выполнено при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Мозг, когнитивные системы, искусственный интеллект».

**Acknowledgments:** This research has been supported by the Interdisciplinary Scientific and Educational School of Moscow University «Brain, Cognitive Systems, Artificial Intelligence».

### Список литературы

- [1] Главацкий С.Т., Бурькин И.Г. Наука о данных для математиков – опыт преподавания // Современные информационные технологии и

образовании: материалы XXXI международной конференции (Троицк Москва, 2–3 июля 2020 г.). – Тривант Москва, 2020. – С. 147–149.

- [2] De Veaux R.D. Curriculum Guidelines for Undergraduate Programs in Data Science / De Veaux Richard D., Agarwal Mahesh, Averett Maia, Baumer Benjamin S., Bray Andrew, Bressoud Thomas C., Bryant Lance, Cheng Lei Z., Francis Amanda, Gould Robert, Kim Albert Y., Kretchmar Matt, Lu Qin, Moskol Ann, Nolan Deborah, Pelayo Roberto, Raleigh Sean, Sethi Ricky J., Sondjaja Mutiara, Tiruvilumala Neelesh, Uhlig Paul X., Washington Talitha M, Wesley Curtis L., White David, and Ye Ping // Annual Review of Statistics and Its Application. 2017. Vol. 4. P. 15–30. URL: <https://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev-statistics-060116-053930> (дата обращения: 08.11.2021).
- [3] Computing Curriculum Committee [Электронный ресурс] / IEEE COMPUTER SOCIETY [сайт]. URL: <https://www.computer.org/volunteering/boards-and-committees/professional-educational-activities/curricula> (дата обращения: 08.11.2021).
- [4] Computing Competencies for Undergraduate Data Science Curricula [Электронный ресурс] / Association for Computing Machinery [сайт]. URL: [https://www.acm.org/binaries/content/assets/education/curricula-recommendations/dstf\\_ccdsc2021.pdf](https://www.acm.org/binaries/content/assets/education/curricula-recommendations/dstf_ccdsc2021.pdf) (дата обращения: 08.11.2021).

**Teaching the fundamental bases of artificial intelligence as the implementation of the concept of new scientific knowledge**  
**Glavatsky S.T., Burykin I.G.**

The modern situation of the development of society is considered, when it comes close to the perception of methods and means of artificial intelligence (AI) in everyday life as the implementation of the principles of new scientific knowledge (doctrine) based on the foundation of «Data Science». The author’s concept of constructing educational trajectories in the training of specialists in the field of AI is offered.

*Keywords:* Artificial Intelligence, Higher Education, Data Scientist, Data Engineer, Data Analyst.

## References

- [1] Glavatsky S.T., Burykin I.G., “Nauka o danny‘x dlya matematikov – opyt преподаvaniya”, *Sovremennye informacionnye tekhnologii v*

*obrazovanii: materialy' XXXI mezhdunarodnoj konferencii (Troitsk Moskva, 2-3 iyulya 2020 g.), 2020, 147-149 (In Russian).*

- [2] De Veaux R.D., "Curriculum Guidelines for Undergraduate Programs in Data Science", *Annual Review of Statistics and Its Application*, **4** (2017), 15-30.
  
- [3] "Computing Curriculum Committee", *Electronic resource* / *IEEE COMPUTER SOCIETY [site]*. URL: <https://www.computer.org/volunteering/boards-and-committees/professional-educational-activities/curricula> (date of the application: 08.11.2021)..
  
- [4] "Computing Competencies for Undergraduate Data Science Curricula", *[Electronic resource]* / *Association for Computing Machinery [site]*. URL: [https://www.acm.org/binaries/content/assets/education/curricula-recommendations/dstf\\_ccdsc2021.pdf](https://www.acm.org/binaries/content/assets/education/curricula-recommendations/dstf_ccdsc2021.pdf) (date of the application: 08.11.2021)..



# Динамическое формирование и обновление карты запасов органического углерода на территории России как задача интеллектуального анализа Больших данных

О. М. Голозубов<sup>1</sup>, О. В. Чернова<sup>2</sup>

Рассматриваются принципы динамического расчета показателей и некоторые алгоритмы интеллектуального анализа данных (data mining), использованные при расчетах карт секвестрации и запасов органического углерода в почвах России в рамках проектов ФАО ООН по созданию глобальных карт. Приводится описание разномодальных и разновременных исходных данных: растровых сеток различных разрешений, векторных данных в географической системе координат, атрибутивной информации. Описан расчет итоговых карт и карт погрешностей в распределенной сети почвенных дата-центров как задачи BigData.

**Ключевые слова:** почвенные базы данных, статистические методы, распределенные системы, органический углерод.

В нашей стране за более чем десятилетнюю историю развития Информационной Системы «Почвенно-географическая база данных Российской Федерации» (ИС ПГБД РФ – <https://soil-db.ru/>) накоплен достаточный объем данных для решения фундаментальных и прикладных задач почвенного мониторинга. Большой массив почвенной информации накоплен научными учреждениями, региональными центрами агрохимической службы страны, а также другими организациями, которые осуществляют мониторинг и наполнение баз актуальных и архивных данных, выполняют обработку данных дистанционного зондирования (ДДЗ).

Ниже приводится краткая характеристика наборов почвенных данных, аккумулированных в ИС ПГБД:

---

<sup>1</sup>Голозубов Олег Модестович — ведущий научный сотрудник, к.б.н., факультет почвоведения Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, e-mail: oleggolozubov@soil.msu.ru.

Golozubov Oleg Modestovich — leading researcher, PhD on biological sciences, Soil Science Faculty, Lomonosov Moscow State University

<sup>2</sup>Чернова Ольга Владимировна — старший научный сотрудник, к.б.н., Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, e-mail: ovcher@mail.ru.

Chernova Olga Vladimirovna — senior researcher, PhD on biological sciences, A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution

**Профильных данных:** 10 500 профилей, из них на территории России – 3 000, в том числе представительных профилей с полным описанием – 900, и соответственно 22 000, 13 000 и 5 000 описаний горизонтов.

**Мелкомасштабные почвенные карты** и карты почвенно-экологического районирования (от М 1:1 000 000 и более мелкомасштабных): 36 000 контуров, из них на территории России 27 000;

**Мелкомасштабные тематические карты:** климатические, растительности, лесов, почвообразующих пород, природно-сельскохозяйственного районирования и другие.

**Среднемасштабные почвенные карты**, почвообразующих пород, эрозии (от М 1:200 000 до М 1:600 000): 30 000 контуров, из них на территории России 27 000.

**Крупномасштабные почвенные карты:** 287 000 контуров, из них на территории России 184 000 контуров, более 25 000 000 га.

Также ИС ПГБД аккумулирует большой объем сопутствующей информации: данные агрохимических обследований, геоботанические и геоморфологические описания, карты землеустройства, севооборотов, эрозии и негативных факторов, справочники методов измерения, классификаторов и многое другое.

Архитектурно-организационные принципы для построения информационных систем почвенного мониторинга и, более широко, пространственно-природных данных сочетают в себе как типовые принципы Big Data, так и особенности пространственно-распределенных мониторинговых сетей. Так, организационным комитетом INSPIRE («Инфраструктура пространственной информации в Евросоюзе»), образованным в 2007 г., проведена работа для создания информационной инфраструктуры, обеспечивающей свободный публичный доступ к пространственной природно-экологической информации [2]. В ней предусматривается: а) хранение только первичных данных в одном месте сбора и обработки; б) обеспечение неразрывности пространственных данных на административных границах; в) их доступности в различных масштабах (от детального для исследований, до обзорного для стратегических целей), и г) обеспечивается «прозрачность» поиска нужной пространственной информации при понятных условиях доступа к ней.

Задачи почвенного мониторинга можно отнести к классу задач Big Data [1]. Основной объект приложения Big Data – искусственные среды (экономика, торговля, курсы валют), или «организованные» среды (здравоохранение), в которых решены проблемы получения исходных данных в цифровой форме. Для анализа естественных природных сред – в метеорологии, геологии, экологии и почвоведении – требуется и более полный сбор данных, и их «гармонизация», и включение моделей в интерпретацию и прогноз.

Проект INSPIRE, так же как ИС ПГБД РФ и аналогичные глобальные мониторинговые проекты решают проблемы постоянного привлечения больших объемов новой информации, ее хранения и обработки. Система управления базами данных (СУБД) и приложения баз данных организуются таким образом, чтобы минимизировать пересылки данных по сети, связывающей узлы соответствующей вычислительной системы. Достигается реальное распараллеливание работы СУБД и приложений, поскольку при отсутствии общих ресурсов между узлами вычислительной системы уменьшается вероятность конфликтов между частями системы и приложений, выполняемыми в разных узлах сети. Также обеспечивается поддержка оперативной аналитической обработки данных [3]. На рис. 1 приведена организационная схема распределенной базы данных ИС ПГБД РФ, отражающая указанные выше принципы.



Рис. 1. Организационная схема ИС ПГБД РФ

Типовые методы и механизмы систем Big Data применительно к задачам почвенного мониторинга имеют ряд особенностей. Исходно, технология комплексного оперативного многомерного анализа данных получила название OLAP. OLAP – это ключевой компонент организации хранилищ данных. Концепция OLAP была описана в 1993 году Эдгаром Коддом, известным исследователем баз данных и автором реляционной модели данных [4]. В литературе эти технологии часто называют Data mining - методы обнаружения в данных ранее неизвестных, нетривиальных, практически полезных и доступных интерпретации знаний, необходимых для принятия решений в различных сферах человеческой деятельности. Для принципиально неполных и разреженных почвенных

данных прогнозирование – важный этап экологического мониторинга, позволяющий заполнить пробелы в данных. При этом решаются задачи регрессии и классификации, формируются сводные отчеты на многомерном «кубе» и глобальные многослойные географические карты, в основном здесь применяются «облачные» решения, поскольку исходная информация тематически и пространственно распределена между соответствующими узлами сети.

В 2017 году ФАО ООН инициировал проект по созданию всемирной карты запасов органического углерода в 30-сантиметровом слое почвы (GSOC17) [5], была предложена единая методика расчетов, при реализации которой требовалось составить также карту оценки погрешности расчетов. В 2020 году в связи с проблемами изменения климата ФАО предложило сформировать мировую карту секвестрации органического углерода SOCSeq, основанную на обновленной карте GSOC17. Обе карты представляют собой постоянно обновляемые веб-ресурсы (<https://www.fao.org/global-soil-partnership/pillars-action/4-information-and-data-new/global-soil-organic-carbon-gsoc-map/en/>) – рис.2.

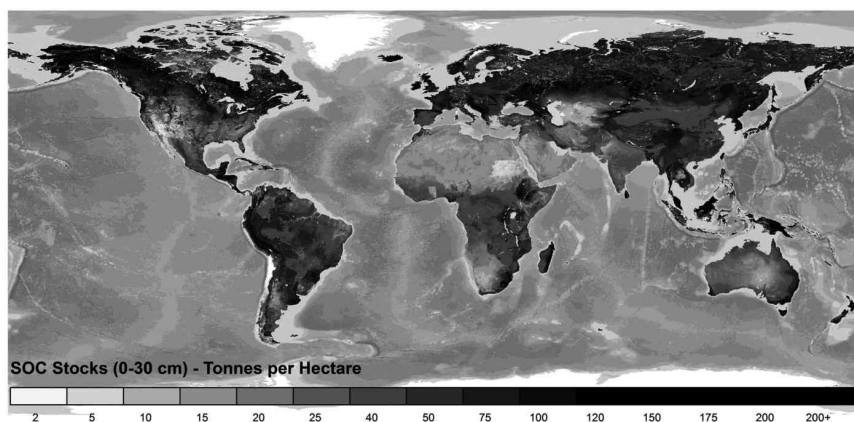


Рис. 2. Пример карты запасов органического углерода на сайте ФАО ООН

Для расчета карт, наряду с прочими характеристиками, были необходимы сведения о редко определяемой экспериментально объемной массе почвенных горизонтов (bulk density). Кроме того, в методике одним из параметров расчета является процентное содержание частиц  $<0.002$  мм в слое почвы 0-30 см [6], что отличается от данных о гранулометрическом составе в градациях, принятых в отечественном почвоведении. Для расчета объемной массы минеральных горизонтов использовали предложенную О.Г. Честных и Д.Г. Замолотчиковым пятипараметрическую функцию нелинейной регрессии, которая позволяет прогнозировать объ-

емную массу в зависимости от содержания гумуса и глубины горизонта [7].

Применимость уравнения регрессии была проверена на заведомо независимых информационных массивах. Верификация уравнения и коэффициентов для почв группы «Таежные» проведена на основе данных по 125 горизонтам из 31 разреза дерново-подзолистых почв Московской области, преимущественно глееватых и глеевых. Средняя относительная ошибка определения плотности для этих почв составила 7.5% (рис. 3). Для почв группы «Степные» применимость коэффициентов проверяли на характеристиках 307 горизонтов из 111 разрезов черноземов обыкновенных и южных черноземов Ростовской области (относительная ошибка - 7.6%) [8].

Для расчета процентного содержания частиц гранулометрической фракции  $<0.002$  была применена модель, состоящая из последовательного ряда статистических методов, в том числе регрессионного анализа, в рамках которой:

- данные представительных профилей, содержащие минимально необходимый набор показателей (гранулометрический состав и содержание гумуса), усреднялись по принадлежности к одинаковым группам почв;
- для приведения полученных по горизонтам данных к слою 0-30 см рассчитывали средневзвешенные значения показателей.

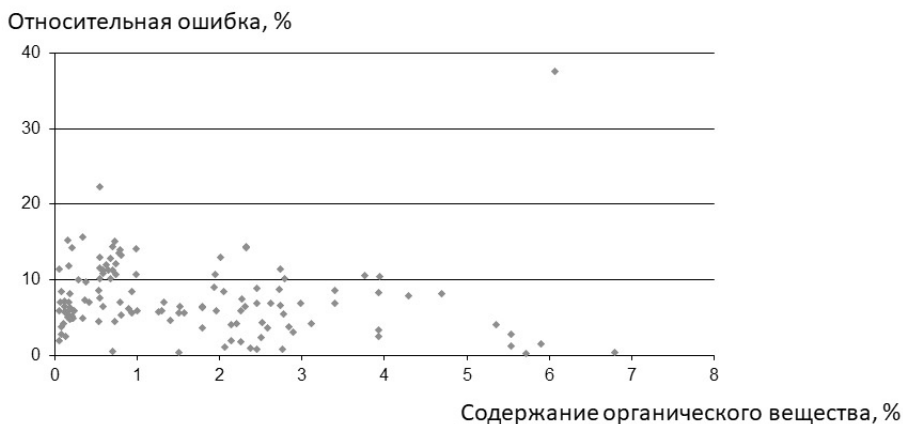


Рис. 3. Зависимость относительных ошибок расчета объемной массы дерново-подзолистых почв от их обогащенности органическим веществом

Такие общепринятые механизмы Big Data как Map Reduce также находят своё применение в мониторинговых системах. Задача распараллели-

ливания данных и решений (Map) здесь решается естественным путем, поскольку вычисления над природно-почвенными данными как правило затрагивают географически локальную информацию и тематически гетерогенную, и размещенную в соответствующих распределенных узлах. А задача сокращения вычислений и их типизация (Reduce) выполняется за счет а) двухтактной системы сбора данных – сначала метаданные, а затем собственно данные от определенных узлов, и б) предобработки данных в узлах сети и окончательной сборки в «облаке».

## Список литературы

- [1] Leskovec J., Rajaraman A., Ullman J., *Mining of Massive Datasets (3rd ed.)*, Cambridge University Press, Cambridge, 2020.
- [2] “INSPIRE D2.8.III.3 Data Specification on Soil – Technical Guidelines”, <https://inspire.ec.europa.eu/data-specifications/2892>.
- [3] Golozubov O.M., Rozhkov V.A., Alyabina I.O., Ivanov A.V., Kolesnikova V.M., Shoba S.A., “Technologies and Standards in the Information Systems of the Soil-Geographic Database of Russia”, *Eurasian Soil Science*, **48**:1 (2015), 1–10.
- [4] Codd E.F., Codd S.B., Salley C.T., “Providing OLAP (on-line analytical processing) to user-analysts: An IT mandate. Technical report”, 1993.
- [5] FAO, *A protocol for measurement, monitoring, reporting and verification of soil organic carbon in agricultural landscapes – GSOC-MRV Protocol*, FAO, Rome, 2020.
- [6] FAO, *Technical specifications and country guidelines for Global Soil Organic Carbon Sequestration Potential Map (GSOCseq)*, FAO, Rome, 2020.
- [7] Chestnykh O.V. and Zamolodchikov D.G., “Bulk density of soil horizons as dependent on their humus content”, *Eurasian Soil Science*, **37** (2004), 816–823.
- [8] Chernova O.V., Golozubov O.M., Alyabina I.O. et al., “Integrated Approach to Spatial Assessment of Soil Organic Carbon in the Russian Federation”, *Eurasian Soil Science*, **54** (2021), 325–336.

### **Dynamic formation and updating of the map of organic carbon stock in Russia as a task of Big Data mining**

**Golozubov O.M., Chernova O.V.**

The principles of dynamic calculation of indicators and some algorithms of data mining used in the calculation of maps of sequestration and stock of organic carbon in the soils of Russia in the framework of FAO UN projects to create global maps are considered. The description of multi-modal and multi-temporal source data is given: raster grids of various resolutions, vector data in the geographical coordinate system, attribute information. The calculation of final maps and error maps in a distributed network of soil data centers is described as a Big Data task.

*Keywords:* soil databases, statistical methods, distributed systems, organic carbon.

## References

- [1] Leskovec J., Rajaraman A., Ullman J., *Mining of Massive Datasets (3rd ed.)*, Cambridge University Press, Cambridge, 2020.
- [2] “INSPIRE D2.8.III.3 Data Specification on Soil – Technical Guidelines”, <https://inspire.ec.europa.eu/data-specifications/2892>.
- [3] Golozubov O.M., Rozhkov V.A., Alyabina I.O., Ivanov A.V., Kolesnikova V.M., Shoba S.A., “Technologies and Standards in the Information Systems of the Soil-Geographic Database of Russia”, *Eurasian Soil Science*, **48**:1 (2015), 1–10.
- [4] Codd E.F., Codd S.B., Salley C.T., “Providing OLAP (on-line analytical processing) to user-analysts: An IT mandate. Technical report”, 1993.
- [5] FAO, *A protocol for measurement, monitoring, reporting and verification of soil organic carbon in agricultural landscapes – GSOC-MRV Protocol*, FAO, Rome, 2020.
- [6] FAO, *Technical specifications and country guidelines for Global Soil Organic Carbon Sequestration Potential Map (GSOCseq)*, FAO, Rome, 2020.
- [7] Chestnykh O.V. and Zamolodchikov D.G., “Bulk density of soil horizons as dependent on their humus content”, *Eurasian Soil Science*, **37** (2004), 816–823.
- [8] Chernova O.V., Golozubov O.M., Alyabina I.O. et al., “Integrated Approach to Spatial Assessment of Soil Organic Carbon in the Russian Federation”, *Eurasian Soil Science*, **54** (2021), 325–336.

# Построение классификаторов в задаче прогнозирования риска неблагоприятного клинического исхода на основе клинико-демографических показателей пациента<sup>1</sup>

Б. Э. Горный<sup>2</sup>, А. П. Рыжов<sup>3</sup>, А. С. Строгалов<sup>4</sup>, А. А. Хусаенов<sup>5</sup>,  
И. А. Шергин<sup>6</sup>, Д. А. Фещенко<sup>7</sup>, А. М. Абдуллаев<sup>8</sup>, А. В. Концевая<sup>9</sup>

<sup>1</sup> работа выполнена при поддержке РФФИ грант № 19-29-01051 «Разработка алгоритмов принятия решений для управления рисками неблагоприятных клинических событий в высокотехнологичной медицинской организации на основе технологии data mining» и Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Мозг, когнитивные системы, искусственный интеллект»

<sup>2</sup> Горный Борис Эмануилович — к.м.н, ведущий научный сотрудник отдела первичной профилактики ХНИЗ в системе здравоохранения ФГБУ «НМИЦТПМ», e-mail: bgornyy@gnicpm.ru

Gornyi Boris Emanuilovich — Ph.D. in medical science, leading researcher of department of Primary Prevention of Chronic Non-Communicable Diseases in the Healthcare System, National Medical Research Center for Therapy and Preventive Medicine

<sup>3</sup> Рыжов Александр Павлович — д.т.н., к.ф.-м.н., MBA, профессор кафедры математической теории интеллектуальных систем мех.-мат. ф-та МГУ; e-mail: alexander.ryjov@gmail.com

Ryjev Alexander Pavlovich — Sc.D. in engineering, Ph.D. in mathematics, MBA, professor, Moscow State University, Faculty of Mechanics and Mathematics, Mathematical Theory of Intelligent Systems department

<sup>4</sup> Строгалов Александр Сергеевич — к.ф.-м.н., доцент кафедры математической теории интеллектуальных систем мех.-мат. ф-та МГУ; e-mail: strogalov@mail.ru

Strogalov Alexander Sergeevich — Ph.D. in mathematics, associate professor, Moscow State University, faculty of Mechanics and Mathematics, Mathematical Theory of Intelligent Systems department

<sup>5</sup> Хусаенов Артем Азатович — аспирант кафедры математической теории интеллектуальных систем мех.-мат. ф-та МГУ; e-mail: a.khusaenov@mail.ru

Khusaenov Artem Azatovich — postgraduate student, Moscow State University, faculty of Mechanics and Mathematics, Mathematical Theory of Intelligent Systems department

<sup>6</sup> Шергин Иван Андреевич — студент 6 курса кафедры математической теории интеллектуальных систем мех.-мат. ф-та МГУ; e-mail: i.a.shergin@gmail.com

Shergin Ivan Andreevich — 6 year student, Moscow State University, faculty of Mechanics and Mathematics, Mathematical Theory of Intelligent Systems department

<sup>7</sup> Фещенко Дарья Анатольевна — заведующая операционным блоком ФГБУ «НМИЦТПМ»; e-mail: dfeshenko@gnicpm.ru

Feshchenko Daria Anatol'evna — the head of surgical block of National Medical Research Center for Therapy and Preventive Medicine, Moscow

<sup>8</sup> Абдуллаев Алсан Муратович — аспирант отдела нарушений сердечного ритма и проводимости ФГБУ «НМИЦТПМ»; e-mail: abdullaevaaslanm@mail.ru

Abdullaev Aslan Muradovich, postgraduate student, National Medical Research Center for Therapy and Preventive Medicine, Moscow



В докладе представлены результаты исследования, выполненного совместно сотрудниками Национального медицинского исследовательского центра терапии и профилактической медицины МЗ РФ и механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, показывающего применимость методов анализа данных в решении задачи прогнозирования риска неблагоприятного клинического исхода на основе информации о пациенте, доступной в клинике (медицинская информационная система «Медиалог»).

**Ключевые слова:** профилактическая медицина, неблагоприятный клинический исход, углубленный анализ данных.

## 1. Введение

Возникновение неблагоприятных событий в процессе оказания медицинской помощи возникает у 10-15% госпитализированных пациентов [1]. Снижение даже на несколько процентов возникновения таких событий позволит сохранить тысячи жизней. Одним из путей решения этой важнейшей проблемы является использование интеллектуальных информационных технологий, позволяющих прогнозировать риск возникновения неблагоприятного клинического исхода у пациентов.

В качестве данных для анализа были использованы 79 клинικο-демографических и лабораторных параметров из МИС «Медиалог» НМИЦТиПМ о 5062 пациентах, которым были выполнены высокотехнологичные эндоваскулярные (60%) и интервенционные аритмологические вмешательства (40%) [2]. В группу рентгенэндоваскулярных операций входили как диагностические (25% - коронарография, ангиография аорты и ее ветвей, ангиография брахиоцефальных артерий), так и лечебные процедуры (75% - ангиопластика и стентирование коронарных (77%), каротидных (7%) и периферических артерий (12,7%), транскатетерное протезирование аортального клапана (0,3%), ренальная денервация 3%). В среднем 15% операций проводились по экстренным показаниям.

В докладе приводится описание формальных свойств используемого набора данных, процедур предобработки данных, и решение задачи прогнозирования риска неблагоприятного клинического исхода различными алгоритмами анализа данных.

---

<sup>9</sup> Концевая Анна Васильевна — д.м.н, заместитель директора ФГБУ «НМИЦТПМ»; e-mail: AKontsevaya@gnicpm.ru

Kontsevaya Anna Vasilievna, Doctor of Medicine, deputy director of National Medical Research Center for Therapy and Preventive Medicine, Moscow

## 2. Основные результаты

### 2.1. Случайный лес

Для построения классификатора был выбран алгоритм построения дерева решений (Decision tree), так как требовалась хорошая интерпретируемость модели для медицинских специалистов. Для увеличения качества итогового дерева на исходных данных сначала использовался алгоритм случайного леса (Random Forest). Далее были выбраны 15 признаков с наибольшим вкладом в предсказание случайного леса, и итоговое дерево решений строилось на выборке, состоящей только из них.

Использовались меры качества алгоритма классификации F1-score и ROC AUC, так как они хорошо подходят для несбалансированных данных (значения целевой переменной относятся как 3079/67). Во избежание переобучения алгоритмов Decision tree и Random forest были введены различные ограничения на их параметры. Использовалась кросс-валидация (cross-validation). Результаты: случайный лес - F1-score = 0.97, ROC AUC = 0.85; дерево решений - F1-score = 0.96, ROC AUC = 0.64.

### 2.2. Нейронная сеть

Неблагоприятные события составляли 2% от доступных данных. Нейронная сеть была обучена выявлять отклонение от благоприятного события [3]. Обучающее множество содержало 2826 благоприятных событий, тестовое содержало 66 неблагоприятных событий (все доступные) и 66 благоприятных событий. Результаты: на основе 23 существенных признаков достигнуто 100% точности тестирования. При добавлении 12 несущественных признаков достигнута точность 96,96%. Ошибка 3% пришлась на ошибку второго рода.

## 3. Выводы

Итоги проведенного исследования показали, что методы машинного обучения можно применять для анализа медицинских данных. Показано, что можно предсказывать неблагоприятный клинический исход пациента при поступлении в клинику, причем с хорошей точностью.

В ходе исследования были выявлены показатели, которые имели наибольшую прогностическую ценность. Полученные результаты могут быть использованы в качестве рекомендации для медицинских работников при первичном осмотре поступивших пациентов, а также позволяют разработать систему прогнозирования риска неблагоприятного клинического исхода по технологии скоринговых систем. Получен вклад наиболее важных переменных в предсказание риска неблагоприятного клини-

ческого исхода. Имея значения этих признаков, медицинский работник в том числе может самостоятельно оценить риск неблагоприятного клинического исхода.

## Список литературы

- [1] Baker G.R. et al, “The Canadian Adverse Events Study: the incidence of adverse events among hospital patients in Canada”, *Can. Med. Assoc. J. Can Med Assoc*, **170**:11 (2004), 1678–1686.
- [2] Горный Б.Э., Рыжов А.П., Строгалов А.С., Журавлев А.Д., Хусаенов А.А., Шергин И.А., Фещенко Д.А., Абдуллаев А.М., Концевая А.В., “Оценка риска неблагоприятного клинического исхода методами углубленного анализа данных”, *Интеллектуальные Системы. Теория и приложения*, **25**:2 (2021), 23–45.
- [3] Хусаенов А.А., “Автоассоциативные нейронные сети в задаче классификации с усеченным множеством”, *Интеллектуальные Системы. Теория и приложения*, **25**:4 (2021).

### The adverse clinical outcome risk classifiers constructing on clinical and demographic patient data

**Gornyi B.E., Ryjov A.P., Strogalov A.S., Khusaenov A.A., Shergin I.A., Feshchenko D.A., Abdullaev A.M., Kontsevaya A.V.**

The report presents the result of joint research carried out by researchers of the National Research Center for Therapy and Preventive Medicine of the Ministry of Health of the Russian Federation and by researchers of Faculty of Mechanics and Mathematics of the Lomonosov Moscow State University, showing the data analysis methods applicability in the problem of an unfavorable clinical outcome risk predicting based on clinic patient information (medical information system «Medialog»).

*Keywords* preventive medicine, adverse clinical outcome, in-depth data analysis.

## References

- [1] Baker G.R. et al, “The Canadian Adverse Events Study: the incidence of adverse events among hospital patients in Canada”, *Can. Med. Assoc. J. Can Med Assoc*, **170**:11 (2004), 1678–1686.
- [2] Gornyi B.E., Ryjov A.P., Strogalov A.S., Zhuravlev A.D., Khusaenov A.A., Shergin I.A., Feshchenko D.A., Abdullaev A.M., Kontsevaya A.V., “The adverse clinical outcome risk assessment by deep data analysis methods”, *Intelligent Systems. Theory and Applications*, **25**:2 (2021), 23–45 (In Russian).
- [3] Khusaenov A.A., “Autoassociative neural networks in a classification problem with truncated dataset”, *Intelligent Systems. Theory and Applications*, **25**:4 (2021) (In Russian).

# Измерение алкогольного благополучия регионов на основе статистической информации

А. П. Рыжов<sup>1</sup>, Б. Э. Горный<sup>2</sup>, А. В. Зудин<sup>3</sup>

Для снижения рисков, связанных со злоупотреблением алкоголем, чрезвычайно важно оценивать уровни алкогольного потребления. При этом недостаточно знать показатели, оценивающие только объем розничных продаж, который не учитывает незарегистрированное потребление алкоголя. Разработка интегрального показателя индекса, базирующегося на доступных статистических данных, позволит нивелировать риски экспертного оценивания и повысить эффективность расходования бюджетных средств в области здравоохранения.

В докладе приводится описание доступной экспертной и фактической информации, структура индекса, предлагается подход к его оценке средствами теории нечетких множеств. Рассмотрены особенности реализации теории расчета индекса в среде Matlab, приводятся примеры. Формулируются и обсуждаются связанные с этим прямые и обратные задачи, решение которых позволит оптимизировать эффективность системы здравоохранения по данному параметру на региональном и федеральном уровнях. Индекс алкогольного благополучия является одним из важных параметров системы здравоохранения с одной стороны и типичным индексом социально-экономических процессов - с другой, поэтому описанные в докладе подходы могут быть применены и для построения широкого набора таких индексов.

**Ключевые слова:** профилактическая медицина, алкогольное благополучие, оценка и мониторинг процессов.

---

<sup>1</sup>*Рыжов Александр Павлович* — профессор каф. математической теории интеллектуальных систем мех.-мат. ф-та МГУ, e-mail: ryjov@mail.ru.

Ryzhov Alexander Pavlovich — professor, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Mechanics and Mathematics, Chair of Mathematical Theory of Intellectual Systems.

<sup>2</sup>*Горный Борис Эмануилович* — кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник национального медицинского исследовательского центра терапии и профилактической медицины Минздрава РФ, e-mail: BGornyuy@gnicpm.ru.

Gorny Boris Emanuilovich — Candidate of Medical Sciences, Leading Researcher at the National Medical Research Center for Therapy and Preventive Medicine of the Ministry of Health of the Russian Federation

<sup>3</sup>*Зудин Андрей Владимирович* — студент каф. математической теории интеллектуальных систем мех.-мат. ф-та МГУ, e-mail: Andrey\_cu1@mail.ru.

Zudin Andrey Vladimirovich — student, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Mechanics and Mathematics, Chair of Mathematical Theory of Intellectual Systems.

## 1. Введение

В современной России злоупотребление алкогольной продукцией приводит к заболеваемости, преждевременной смерти людей, росту преступности, насилия, сиротства и других социально-экономических и медико-демографических проблем. С потреблением алкоголя связано около 30% всех смертей в России, что в 5-9 раз выше аналогичного показателя в некоторых странах Европейского региона, Японии и США. Разработка и мониторинг эффективности региональных программ, направленных на снижение масштабов злоупотребления алкогольной продукцией и профилактику алкоголизма среди населения, невозможны без оценки ситуации в регионе.

Традиционно оценка алкогольной ситуации основывается на статистических показателях розничных продаж различных видов алкоголя. Но необходимо понимать, что этот показатель не отражает истинной ситуации в регионе, так как часто имеет место незарегистрированное потребление алкоголя. Поэтому судить об алкогольной ситуации опираясь только на данные розничных продаж, неверно [1, 2]. Авторами был предложен интегральный показатель, который объединял в себе как факторный признак – уровень потребления, так и результирующие признаки, наиболее тесно связанные с ним, такие как смертность, заболеваемость и ряд других демографических и социально-экономических индикаторов, потенциально связанных с употреблением алкоголя. Предложенный подход продемонстрировал прогнозную значимость данного индекса, названного интегральным индексом алкогольной ситуации (ИИАС), показав региональные различия в смертности от ряда хронических неинфекционных заболеваний в зависимости от величины ИИАС [3]. Но несмотря на это, были выявлены определенные ограничения индекса, связанные с недоучетом значимости каждого из показателей в общей оценке.

В данной работе был реализован другой подход для расчета индекса, который учитывал не только величину самих показателей, но и их значимость для оценки ситуации. Он основан на технологии оценки и мониторинга сложных процессов [4], позволяющей на основе фрагментарной информации получать интегральную оценку состояния процесса и моделировать возможные варианты его развития. Целью данной работы является описание построения нового индекса и обсуждение вариантов его использования.

## 2. Особенности доступных данных и экспертизы

Статистические показатели, которые имеют прямое и косвенное отношение к алкогольному благополучию:

- показатели розничной продажи алкогольных напитков: продажи пива, вина, крепкого алкоголя;
- социально-экономические показатели: преступления, совершенные в состоянии опьянения; уровень безработицы; число детей, оставшихся без попечения родителей; количество лиц, погибших в ДТП; доля населения с доходами ниже прожиточного минимума; число разводов;
- показатели заболеваемости: алкоголизмом, алкогольным психозом, циррозом печени, панкреатитом, туберкулезом;
- показатели смертности: общая смертность; смертность от внешних причин; смертность от цереброваскулярных заболеваний; смертность от болезней печени и поджелудочной железы.

Эта информация собирается на регулярной основе статистическими органами страны на региональном и федеральном уровне.

Кроме перечисленных статистических данных, использовались экспертные знания о влиянии перечисленных выше признаков на алкогольное благополучие. Был сформулирован набор правил, которые позволят определенным образом структурировать имеющиеся показатели. В докладе показано, как, располагая большим количеством косвенных данных и знаниями специалистов в предметной области, можно построить индекс алкогольного благополучия.

Отметим, что рассматриваемый индекс – пример большого числа подобных индексов, которые можно применять в экономических, социологических исследованиях и в государственном управлении.

### **3. Построение индекса алкогольного благополучия**

Структура индекса представлена на рис. 1.

Значения каждого признака из листьев дерева и каждого узла были разбиты на 4 нечетких множества, соответствующие по смыслу значениям: «Низкий», «Относительно низкий», «Относительно высокий», «Высокий». Набор значений определялся исходя из удобства формулировки правил. Были опробованы несколько алгоритмов построения функций принадлежности, наилучший результат показал известный алгоритм *s-means*.

Помимо признаков, была сформулирована база правил, обеспечивающая связь между узлами дерева. Правила имеют форму «Если . . . , то . . . ». База содержит 74 таких правила.



Рис.1 Структура индекса алкогольного благополучия.

В качестве среды для построения индекса был выбран Matlab, содержащий пакет расширения Fuzzy Logic Toolbox - инструмент для проектирования систем нечеткой логики. Детали и особенности разработки индекса, и результаты расчета индекса для всех регионов страны обсуждаются в докладе.

Такой индекс позволяет решать как прямые (оценка влияния изменения некоторого параметра на состояние алкогольного благополучия), так и обратные задачи (достижение максимального эффекта в рамках заданных бюджетных ограничений и достижение заданного эффекта в рамках минимального бюджета), которые также обсуждаются в докладе.

## Список литературы

- [1] Горный Б. Э., Калинина А. М., Бойцов С. А. Выявление лиц с риском пагубного употребления алкоголя в ходе диспансеризации: методологические аспекты. Профилактическая медицина. 2015;18(4):12-16. <https://doi.org/10.17116/profmed201518412-16>
- [2] Горный Б. Э., Калинина А. М. Интегральная оценка алкогольной ситуации на региональном уровне. Профилактическая медицина. 2016;19(3):34-40. <https://doi.org/10.17116/profmed201619334-40>
- [3] Горный Б. Э., Калинина А. М. Связь интегральной оценки региональной алкогольной ситуации и смертности населения от некоторых хронических неинфекционных заболеваний. Профилактическая медицина. 2019;22(4):65-68. <https://doi.org/10.17116/profmed20192204165>

- [4] Рыжов А.П. Оценка и мониторинг процессов в социотехнических системах и связанные с ними задачи. Интеллектуальные Системы Теория и приложения. Т. 22, Вып. 2, 2018, с. 129-139. <http://intsysjournal.org/pdfs/22-2/Rizov.pdf>

## Measurement of alcohol well-being in regions based on statistical information

Gorny B.E., Zudin A.V., Ryjov A.P.

To reduce the risks associated with alcohol abuse, it is extremely important to assess alcohol consumption levels. At the same time, it is not enough to know indicators that assess only the volume of retail sales, which does not take into account unrecorded alcohol consumption. The development of an integral indicator of the index, based on available statistical data, will make it possible to level the risks of expert assessment and increase the efficiency of spending budget funds in the field of healthcare.

The report provides a description of the available expert and factual information, the structure of the index, an approach to its assessment by means of the theory of fuzzy sets is proposed. The features of the implementation of the index calculation in the Matlab environment are considered, examples are given. The related direct and inverse problems are formulated and discussed, the solution of which will optimize the efficiency of the healthcare system in this parameter at the regional and federal levels. The alcohol well-being index is one of the important parameters of the health care system, on the one hand, and a typical index of socio-economic processes, on the other, therefore, the approaches described in the report can be applied to construct a wide set of such indices.

*Keywords:* preventive medicine, alcohol well-being, process evaluation and monitoring.

## References

- [1] Gorny B.E., Kalinina A. M., Boytsov S. A. Identification of persons at risk of harmful use of alcohol during clinical examination: methodological aspects. Preventive medicine. (In Russian) 2015;18(4):12-16. <https://doi.org/10.17116/profmed201518412-16>
- [2] Gorny B.E., Kalinina A. M. Integral assessment of the alcoholic situation at the regional level. Preventive medicine. (In Russian) 2016;19(3):34-40. <https://doi.org/10.17116/profmed201619334-40>
- [3] Gorny B.E., Kalinina A. M. The relationship between the integral assessment of the regional alcoholic situation and the mortality



rate of the population from certain chronic non-infectious diseases. Preventive medicine. (In Russian) 2019;22(4):65-68. <https://doi.org/10.17116/profmed20192204165>

- [4] Ryjov A.P. Assessment and monitoring of processes in socio-technical systems and related tasks. Intelligent Systems Theory and Applications. (In Russian) 2018,22(2):129-139. <http://intsysjournal.org/pdfs/22-2/Rizov.pdf>

# Построение поисковой системы, учитывающей контекстное вхождение общих между запросом и документами слов

И. В. Тарлинский<sup>1</sup>

Представлен подход к построению поисковой системы, учитывающей как контекст, так и вхождение общих между запросом и документами слов.

**Ключевые слова:** поисковые системы.

На сегодняшний день одним из самых эффективных способов построения поисковой системы является отображение поисковых единиц в векторное пространство  $V = \mathbb{R}^n$  фиксированной размерности  $n$ . Такой подход применяется к данным совершенно разной модальности: картинкам, текстам, аудио-дорожкам и т.д. После вложения данных в евклидово пространство, поиск осуществляется по вектору во вложенном конечномерном пространстве  $V$ , используя для этого различные варианты алгоритма «ближайшего соседа» [1].

Очевидно, что при таком «общем» подходе к проектированию системы точность любого поиска определяется всего двумя параметрами: качеством вложенных векторов и точностью алгоритма поиска в пространстве  $V$ . Алгоритмы «поиска ближайшего соседа» инвариантны относительно модальности данных и могут быть исследованы отдельно от самой задачи поиска [1].

В свою очередь задача информационного поиска часто решается с учетом структуры самих данных.

Так, например, в реализации поиска по текстовым документам хорошо себя зарекомендовал алгоритм ранжирования BM25 (англ. «Best Match») [3], использующий в основе своей работы структуру обратного инвертированного индекса, сопоставляющую каждому слову документы, в которых это слово встречалось. При таком подходе сложность обработки запроса растет нелинейно по количеству документов и коррелирована с распределением слов по документам, что очень эффективно и быстро. В то же время, огромным недостатком этого подхода является неспособность понимать «контекст» запроса и выдавать релевантные документы,

---

<sup>1</sup>Тарлинский Игорь Викторович — DL NLP Engineer, Myna Labs, e-mail: itarlinskiy@gmail.com.

Tarlinskiy Igor Viktorovich — DL NLP Engineer, Myna Labs.

не содержащие общих слов с запросом. Кроме того, часто бывает и обратная ситуация, при которой выдаются документы, имеющие общие слова с запросом пользователя, но даже близко не похожие на ответ. Особенно сильно вышеупомянутая проблема характерна для морфологически сложных языков, в которых нередко встречаются омонимы.

С другой стороны, для учета контекста документов, с целью различать слова омонимы и сделать поиск более осмысленным существуют не одна языковая модель, позволяющая моделировать представление текстов, учитывая контекст. Одной из последних моделей стала нейронная сеть BERT [2], отображающая документы  $d_i$ , длиной не более  $d_i \leq 512$  слов в  $\mathbb{R}^n$ ,  $n = 768$  (базовая версия). Однако нетрудно заметить, что какой бы точной и качественной не была языковая модель, с ростом количества данных, поиск «по вектору» будет все менее и менее точным. Помимо ограничений, накладываемых на точность, скорость поиска теперь пропорциональна количеству документов. Возникает вопрос: можно ли совместить «контекстность» и точность нейронного подхода с эффективностью структуры обратного инвертированного индекса?

В докладе будет представлен подход, позволяющий по запросу  $Q$  рассматривать только документы  $D = \{d_i\}_{i=1}^n$ , имеющие с запросом общие слова, что позволит выиграть в скорости, но в то же самое время, учитывать контекст, в котором то или иное слово встречается в документе. В предложенной модели семантика и контекстное представление будут основаны на уникальном способе моделирования текстовых данных нейронной сетью BERT [2]. Расскажем про преимущества и недостатки такого подхода, в частности: что делать, если в запросе есть слово, которого не было ни в одном документе.

Отдельное спасибо моему научному руководителю к.ф.-м.н. Крейнес Е.М. за помощь при подготовке данного доклада, советы и консультации по исследованиям в области обработки текстовых данных на естественном языке.

## Список литературы

- [1] Andoni A., Indyk P., Razenshteyn I., “Approximate Nearest Neighbor Search in High Dimensions”, 2018, 27 pp., arXiv: 1806.09823
- [2] Devlin J., Chang M.-W., Lee K., Toutanova K., “BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding”, 2018, 16 pp., arXiv: 1810.04805
- [3] Pérez-Iglesias J., Pérez-Agüera J. R., Fresno V., Feinstein Y. Z., “Integrating the Probabilistic Models BM25/BM25F into Lucene”, 2009, 6 pp., arXiv: 0911.5046

**The search system with both exact lexical matching and contextualized word representations common in between query and documents**  
**Tarlinskiy I. V.**

An approach to building a search engine that takes into account both the context and the occurrence of common words between the query and documents is presented.

**Keywords:** search engines.

## **References**

- [1] Andoni A., Indyk P., Razenshteyn I., “Approximate Nearest Neighbor Search in High Dimensions”, 2018, 27 pp., arXiv:1806.09823
- [2] Devlin J., Chang M.-W., Lee K., Toutanova K., “BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding”, 2018, 16 pp., arXiv:1810.04805
- [3] Pérez-Iglesias J., Pérez-Agüera J. R., Fresno V., Feinstein Y. Z., “Integrating the Probabilistic Models BM25/BM25F into Lucene”, 2009, 6 pp., arXiv:0911.5046

**Часть 4.**  
**Обработка естественного языка**

# Интенциональная семантика в анализе естественного языка

И. А. Бескова<sup>1</sup>

В выступлении будет затронута тема возможности применения логико-семантических средств в анализе естественного языка. Как наиболее продуктивные для такого анализа избраны эпистемические контексты, поскольку они предъявляют высокие требования к пытающимся репрезентировать их динамики системам. В частности, по отношению к belief-контекстам не очевидна связь по истинности между подоператорным выражением и содержащим его сложным предложением: при ложности подоператорного, содержащее его сложное выражение может быть истинно и наоборот: при истинности подоператорного содержащее его сложное выражение может быть ложным. Еще один неочевидный момент: невозможность совершать в таких контекстах подстановку на основе тождества значений, требуется совпадение по смыслу (синонимия). В связи с этим предлагается некая интуитивно прозрачная схема интенциональной основы понимания семантики, базирующейся на понятии идеальных миров.

**Ключевые слова:** эпистемические контексты, семантика, естественный язык, значение, смысл.

В выступлении затронута тема возможности применения логико-семантических средств в анализе естественного языка<sup>2</sup>.

Разработка искусственно-интеллектуальных ресурсов, среди прочего, соотнесена с конструированием средств эффективного анализа интенциональных контекстов. Поэтому полезно рассмотреть особую их разновидность (эпистемические), представляющую, возможно, наиболее серьезный вызов попыткам применения формально-логического инструментария в исследовании языка — в частности, в связи с проблемами машинного перевода.

Одними из наиболее сложных в этом плане считаются так называемые В-контексты (belief-contexts), содержащие выражения, характеризующие состояния знания субъекта или особенности его мнения. Например,

---

<sup>1</sup>Бескова Ирина Александровна — Институт философии Российской академии наук, Ведущий научный сотрудник, Доктор философских наук, e-mail: irina.beskova@mail.ru.

Ирина Beskova — DSc in Philosophy, Leading Research Fellow in the Institute of Philosophy (Russian Academy of Sciences).

<sup>2</sup>Исследование поддерживается грантом Министерства науки и высшего образования РФ (проект “Новейшие тенденции развития наук о человеке и обществе в контексте процесса цифровизации и новых социальных проблем и угроз: междисциплинарный подход“, соглашение № 075-15-2020-798).

«Джон считает, что все лебеди белы» или «Питер знает, что число жителей Берлина больше миллиона». Другие аналогичные операторные выражения эпистемического ряда: «верит», «полагает», «надеется», «ощущает», «думает» и пр. При оперировании такими контекстами ни *объективная истинность* подоператорных выражений (т.е. их истинность в выделенном мире), ни *L-эквивалентность* (т.е. совпадение их по значению во всех возможных мирах) не гарантируют сохранения отношения следования при выведении одних истинных суждений из других, содержащих подобного рода операторные выражения. Это объясняется тем, что логическая истинность, т.е. истинность во всех возможных мирах, слабее, чем истинность выражения в мирах знания-мнения субъекта, поскольку, как известно, знание человека несовершенно, следовательно, может случиться так, что данный конкретный индивид не будет знать очевидных для всех истин. Поэтому выполнение требования общезначимости подоператорного выражения не гарантирует сохранения выводимости: если даже высказывание истинно во всех возможных мирах, оно не всегда будет удовлетворять принципу взаимозаменяемости Фреге<sup>1</sup>. Кроме того, субъект знания может быть непоследовательным в своих воззрениях и даже противоречить самому себе, а это значит, что обстоятельство установления непротиворечивости также ничего не гарантирует в случае В-контекстов.

Так, в одном из вышеприведенных примеров подоператорное выражение ложно («все лебеди белы»), но при этом содержащее его сложное предложение может быть истинно (некий конкретный Джон вполне может не знать о существовании черных лебедей и искренне верить в то, что все лебеди белы). Напротив, второй пример, касающийся знания Питера, высвечивает противоположную ситуацию: несмотря на истинность подоператорного выражения «Число жителей Берлина больше миллиона», содержащее его сложное выражение с оператором «знает» может быть ложно.

Если же мы рассматриваем вывод, т.е. переход от одних истинных утверждений к другим, истинным же, ситуация может стать еще более сложной: даже *L-эквивалентность* подоператорных выражений (т.е. их совпадение по значению **во всех возможных мирах**) не гарантирует сохранения истинностного значения при подстановке одного суждения вместо другого, ему *L-эквивалентного*.

---

<sup>1</sup>Принцип взаимозаменяемости постулирует, что выражения взаимозаменяемы, если и только если при выводе из истинного предложения мы не получим ложное. Т.е. подстановка вместо одного истинного выражения другого, ему логически эквивалентного, возможна, если истинностное значение сложного контекста, содержащего первое выражение, при подстановке сохраняется.

Чтобы лучше понять природу затруднения, остановлюсь чуть подробнее на соотношении понятий **L**-эквивалентности и синонимии.

В логике **L**-эквивалентными называют выражения, совпадающие по значению во всех возможных мирах, достижимых из данного, а синонимичными — совпадающие по смыслу.

Рассмотрим пример. Пусть исходным суждением будет

1. «Число жителей Кейптауна больше миллиона».

Одним из выражений с эпистемическим оператором пусть будет предложение

2. «Никита знает, что число жителей Кейптауна больше миллиона».

Выражению «Число жителей Кейптауна больше миллиона» **L**-эквивалентно (т.е. совпадает с ним по значению во всех возможных мирах) выражение

3. «Число жителей Кейптауна больше  $10^6$ ».

И пусть производным от него будет выражение

4. «Никита знает, что число жителей Кейптауна больше  $10^6$ ».

Оправданно ли мы совершили подстановку в контекст? Можно ли было подоператорное выражение «Число жителей Кейптауна больше миллиона» заменить на **L**-эквивалентное ему «Число жителей Кейптауна больше  $10^6$ » в сложном выражении с оператором «знает»? Очевидно, что нет. В частности, если Никита — ученик первого или второго класса, он может знать, что число жителей Кейптауна больше миллиона, но не знать, что оно больше  $10^6$ , поскольку в школе возведение в степень в этом возрасте еще не проходят. Тогда при подстановке в одно истинное суждение (2) вместо его подоператорного выражения (1) другого истинного суждения, ему **L**-эквивалентного (3), т.е. совпадающего с ним по значению **во всех возможных мирах**, мы можем из истинного суждения (2) получить ложное суждение (4). И значит замена была неправомерной: при подстановке в одно истинное выражение с оператором эпистемического ряда (Кар, Вар) другого, **L**-эквивалентного его подоператорному выражению, из истинного суждения мы можем получить ложное. Т.е. принцип выводимости (из истинного суждения должно следовать истинное же) будет нарушен. Это, в частности, подтверждает, что **L**-эквивалентность выражений не тождественна их синонимии. Т.е. обстоятельство совпадения выражений по значению **во всех возможных мирах** не обеспечивает их тождества по смыслу.

Для анализа таких и подобных им контекстов используются интенциональные семантики. Они могут различаться, но главная идея в них заключается в том, что структура миров знания отличается от структуры возможных миров, в которых предложение оценивается на **L**-истинность.

Однако определенного рода вопросы возникают при попытках понять интуиции, которые стоят за интенциональными семантиками. Это свое-



го рода интерпретация интерпретации, которая может быть полезна для того, чтобы представлять себе перспективы развития самих этих средств анализа. Например, семантика интенциональных миров М. Крессвелла [1]. В ней проблемы, подобные описанным, предлагается решать за счет различения возможных миров, идеально-реальных (world-heaven) и идеальных (heaven). Вместе с тем, не вполне понятно, чем по структуре отличаются идеально-реальные миры от идеальных, а также какой смысл стоит за идеей «соответствия» идеально-реальных миров выделенному миру.

На мой взгляд, возможной (по отношению к идеальным мирам) является следующая интерпретация: миры знания субъекта представляют собой множества, элементами которых являются множества **миров, достижимых из мира данной субличности**. Субличностью буду называть устойчивое ментальное образование, которое генерирует, замыкая в себе, множества паттернов само- и миропонимания данного субъекта. Из мира данной субличности достижимы миры, которые воспринимаются ею как для-нее-возможные. Если речь идет об анализе контекстов с подоператорными выражениями эпистемического ряда, это будут положения вещей, расцениваемые ею как потенциально допустимые. Таким образом, миры знания-мнения субъекта познания могут быть представлены как множество множеств миров знаний-мнений его субличностей. В свою очередь, миры знания-мнения субличности выразимы как множества описаний состояний, выступающих для данной конкретной субличности в статусе достижимых из мира, играющего для нее роль выделенного. В обычных случаях – пространства, которое она рассматривает как среду собственного реального существования.

Как нетрудно видеть, в предлагаемой интерпретации выделенным может быть не только пространство бытования человека как констелляции ряда субличностей, но и каждой отдельной субличности. Это, как представляется, позволит включить в рассмотрение, наряду с эпистемическими, также и контексты, которые репрезентируют формы мышления и рассуждения, характерные для разного типа расстройств личности. Например, диссоциативного расстройства по типу множественной личности (когда определенные «составляющие» пространства ментальной психической жизни целостного «Я» человека присваивают себе право говорить от собственного лица), девиантных умозаключений в рамках искаженной картины мира, возможно, – в состоянии бреда, и пр. И уж тем более на этой основе будут анализируемы миры фантазий, сновидные символы-образы, а также более мягкие варианты искаженного функционирования пространства знания-мнения субъекта.

## Список литературы

- [1] Cresswell M.J., *Logics and Languages.*, MethuenCo Ltd., London, 1973, 273 pp.

### Semantics of Belief Contexts in the Natural Language Analysis Beskova I.A.

The idea of the presentation addresses to possibility of logical-semantic tools applying in the natural language analysis. Epistemic contexts have been chosen as the most productive for such analysis, since they impose high requirements on systems trying to represent their dynamics. In particular, the truth relation between the sub-operative expression and the complex sentence containing it is not obvious: though the sub-operative expression is false, the complex expression may be true, and vice versa. Another non-obvious point: it is impossible to perform substitution in such contexts based on the values' identity; a coincidence in meaning (synonymy) is required. In this regard, a kind of intuitively transparent scheme of belief contexts semantics' understanding based on the concept of ideal worlds is proposed.

*Keywords:* epistemic contexts, semantics, natural language, denotation, meaning.

## References

- [1] Cresswell M.J., *Logics and Languages.*, MethuenCo Ltd., London, 1973, 273 pp.

# Сетевой кластерный подход к анализу естественного языка и его применение

А. Д. Богомолова<sup>1</sup>

Кластерный подход к анализу естественного языка решает проблему трудоемкости и больших временных затрат при анализе подобного типа данных. Он позволяет увидеть общую объективную картину научных исследований как в динамической форме, так и в моменте времени для анализа текущей ситуации. Метод совмещает в себе возможности машинного обучения и когнитивных способностей человека, являясь эффективным способом для анализа больших объемов данных. Метод подходит для разнообразных целей и здесь представлены примеры использования в трех различных проектах.

**Ключевые слова:** Кластерный подход, анализ естественного языка, патентный анализ, токенизация, сетевой граф

Проблема анализа текстовой информации является сложной и актуальной задачей. Текст имеет более сложную структуру, чем числовые или категориальные данные, поэтому его труднее анализировать методами машинного обучения. Тем не менее, в век технологического господства необходимо использовать всю доступную информацию, в том числе тексты, содержащие огромное количество знаний [1].

Существует множество методов анализа текста [2]. Прежде всего, это метод Word2Vec, затем идет длинная цепь элементов краткосрочной памяти (long short-term memory; LSTM), модель классификации К-ближайшего соседа (K-Nearest Neighbor classification model), свёрточные нейронные сети (convolutional neural network, CNN) и другие модели, основанные на них. Однако анализ полных текстов требует больших вычислительных ресурсов и трудоемкой очистки данных. Для большинства методов необходима обучающая выборка. Также стоит задача составить обширный словарь устойчивых словосочетаний и «ненужных слов», таких как вводные слова, союзы, артикли и т.д. Семантический словарь может занять годы, а обучение модели может оказаться непростой задачей. Когда речь идет об анализе научных трудов, таких как патенты и публикации, задачу еще больше усложняет обилие научных терминов, формул и специальных обозначений.

Тем не менее, анализировать научные труды – это хороший способ найти актуальные технические тренды, потенциальные точки роста в

---

<sup>1</sup>Богомолова Арина Дмитриевна — аспирант МГУ им. М. В. Ломоносова; e-mail: arina.bog@gmail.com

Bogomolova Arina Dmitrievna — graduate student, Lomonosov Moscow State University.

междисциплинарных темах и даже предугадать инновации в отдельных компаниях. С точки зрения университета, анализ развития узких научных направлений является полезной возможностью для предвосхищения потребности в определенных компетенциях и, соответственно, обогащения учебных курсов для подготовки востребованных специалистов. Очевидно, что для эффективного использования результатов анализа технологических трендов, исследование не может занимать долгое время, так как ситуация может измениться буквально за месяцы, так как каждый день появляются десятки и даже сотни статей и новых патентов. Обработка таких объемов научной информации уже превышает возможности человека, но машинное обучение также займет немало времени и усилий, если использовать распространенные методы.

Таким образом появляется необходимость разработать метод анализа научных текстов, таких, как патенты и публикации, соединяющий когнитивные способности человека и вычислительные мощности машины для получения актуальных результатов.

Суть предлагаемого нами метода состоит в следующем алгоритме действий:

- **Подготовка данных:**

- Основным ограничением может быть узкая научная тематика, одна или несколько организаций, или даже некоторая группа ученых.
- Тип данных может состоять как из полных текстов патентов или публикаций, так и только из названий, ключевых слов или аннотаций. От выбора типа данных зависит трудоемкость и точность результатов.
- Выбор временного промежутка также влияет на результат. Хотим ли мы проследить зарождение и развитие технологических инноваций в динамике (тогда мы выбираем набор временных промежутков) или посмотреть в моменте тематическую близость и междисциплинарный потенциал в рамках основного ограничения.

- **Сбор данных и оценка их качества:** на данном этапе мы проверяем достоверность данных и их пригодность для анализа. Также на этом этапе мы можем оценить полноту выборки.

- **Первичная очистка данных** включает в себя удаление знаков препинания и «ненужных слов», а также лемматизация текстов.

- **Токенизация** представляет собой превращение каждого отдельного слова в токен (или точку). Вес или величина точки зависит от частоты присутствия слова в исследуемой выборке.
- **Построение сетевого графа**, вершинами которого являются токены. Ребро между двумя токенами строится в том случае, если эти два токена встречаются в одном текстовом объекте. Толщина ребра пропорциональна частоте употребления двух токенов вместе.
- **Кластеризация** точек сетевого графа одним из классических методов кластеризации. В своем исследовании [1] мы выяснили, что наиболее подходящим для наших целей являются методы Лувейна и Лейдена [3] при условии использования показателя модулярности [4] как функции качества (quality function).
- **Интерпретация результатов** является последним шагом данного алгоритма, и здесь необходимы когнитивные способности человека, имеющего хотя бы начальные познания в исследуемой теме. Именно поэтому данный метод наиболее полезен для научных сотрудников в университетах, так как они обладают необходимыми знаниями в своих темах, а представленный кластерный подход к анализу естественного языка позволяет им увидеть картину в целом и проанализировать сотни и тысячи статей без непосредственного чтения полных текстов.

Данный метод используется нами для различных аналитических проектов. Далее приводятся примеры практического использования.

Во-первых, данный метод подходит для анализа узких научных направлений. В нашем случае мы проводили анализ патентов по теме возобновляемой энергетики [5]. В этом исследовании мы рассмотрели патенты, связанные с энергоэффективностью, выданные с 1973 по 2019 год. В ходе работы мы проанализировали более 108 000 патентов, выданных за этот период по всему миру. Чтобы продемонстрировать тенденции в данной научной области, мы разделили патенты на семь групп, первая группа охватывает вопросы патентов с 1973 по 1989 год, а остальные охватывают оставшийся период времени с шагом в пять лет. Стоит отметить, что количество патентов в этой области стремительно растет, особенно в последние годы.

В результате мы ясно видим, что исследования, ведущие к повышению энергоэффективности и, следовательно, достижению целей в области устойчивого развития, быстро расширяются за последние три десятилетия. В последние несколько лет произошел значительный сдвиг в темах исследований с эффективности сжигания природного газа в 1970-х

и 1980-х годах на исследования топливных элементов и солнечной энергии. Можно с уверенностью сказать, что технологии, связанные с возобновляемой энергией, являются основным направлением патентования в области, связанной с энергоэффективностью. Далее можно подробно рассмотреть трансформацию каждого кластера тем и выделить более конкретные технологические решения, которые в будущем могут стать хорошим конкурентным преимуществом для компаний.

Во-вторых, описанный нами метод можно использовать для анализа деятельности конкретных компаний. Для того, чтобы продемонстрировать работу алгоритма мы взяли компанию Apple в качестве примера [1]. Таким образом мы анализировали патенты, принадлежащие Apple Inc., опубликованные с января 2019 года по сентябрь 2020 года. В выборку вошли 13 500 патентов по различным темам.

Согласно полученным результатам, можно было предположить, что компания провела большинство исследований за эти полтора года в следующих областях: коммуникации (то есть налаживание технологий связи и распространения сигнала), физический интерфейс и электроника, пользовательский интерфейс и виртуальный помощник. Также можно обнаружить задел на разработку более совершенной системы биометрической идентификации и ряд патентов, посвященных теме снижения энергопотребления экраном. Большинство из этих предположений оправдались и нашли свое отражение в вышедшем уже после публикации статьи iPhone 13.

И наконец третий пример использования данного алгоритма обработки информации в форме естественного языка – это анализ компетенций и междисциплинарного взаимодействия внутри одного из крупных технических региональных университетов, впоследствии вошедшем в программу «Приоритет 2030». За основу были взяты публикации сотрудников университета в рейтинговых журналах.

В ходе проекта были выделены 5 сильных научных школ на базе университета, а также интенсивность междисциплинарного взаимодействия между этими школами. Самый основательный и емкий химический научный кластер в тоже время является наиболее закрытым и обособленным. В нем также не задействовано новых перспективных технологий, таких как искусственный интеллект и машинное обучение. Поэтому можно сделать вывод о том, что для развития этой научной школы на уже существующем крепком фундаменте исследований необходимо выходить за рамки привычных тем и вести больше совместных проектов с другими школами для обогащения и актуализации тем и методов. Наука о материалах, которая чаще всего является связующим звеном между физикой и химией в данном случае очень тесно интегрирована с физикой, но не с химией. Математика также в большинстве случаев встречается в статьях

с физической тематикой. Биология и геология являются обособленными и слабо развитыми школами. Таким образом физическая научная школа является основной двигательной силой университета, применяет современные методы и взаимодействует с коллегами из других сфер науки. Далее полученные выводы на основе такой общей картины научной деятельности были использованы для формирования стратегии развития университета и эффективных мер по стимуляции исследовательской деятельности.

Таким образом, в данной работе был рассмотрен метод кластерного анализа естественного языка и возможности его применения на практике. В наших проектах мы использовали его чаще всего для анализа названий и аннотаций патентов и публикаций, но также существует потенциал для использования этого метода на других формах данных в форме естественного языка. Главное преимущество этого метода анализа - его скорость, простота и универсальность. Таким образом, этот метод - лучший выбор для быстрой оценки ситуации в определенной компании или сфере деятельности. Дальнейшие исследования будут связаны с улучшением методов очистки данных и упрощением анализа более длинных текстов с использованием того же метода кластеризации. Мы также заинтересованы в сокращении экспертного элемента в алгоритме принятия решений, но при этом с сохранением преимущества небольших временных затрат на реализацию.

## Список литературы

- [1] Bogomolova A., Ryazanova M. Balk I., *Cluster approach to analysis of publication titles*, Journal of Physics: Conference Series 1727, 2021, 012016 pp.
- [2] Kim, JM., Kim, NK., Jung, Y. et al., "Patent data analysis using functional count data model", *Soft Comput.*, **23** (2019), 8815–8826
- [3] Traag V.A., Waltman L., van Eck N.J., "From Louvain to Leiden: guaranteeing well-connected communities", *Scientific Reports*, **9** (2019).
- [4] Blondel V D, Guillaume J.L., Lam biotte R., Lefebvre E., "Fast unfolding of communities in large networks", *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2008, 10008 pp.
- [5] Bogomolova A., Balk I., Semenov E., Ivaschenko N., "Network Analysis of Patenting Trends in Energy Efficiency", *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, **317**:1 (2019), 012005 pp.

### Cluster network approach to natural language analysis and its applications Bogomolova A.D.

The cluster approach to natural language analysis solves the problem of labor and time consuming in this data form analysis. It gives

opportunity to see the overall objective picture of scientific research in both dynamic form and in static to analyze the current situation. The method combines the capabilities of machine learning and human cognitive abilities which is an efficient way to analyze large amounts of data. The method is suitable for a variety of purposes and in this article there are some examples of its applications.

*Keywords:* Cluster approach, natural language analysis, patent analysis, tokenization, network

## References

- [1] Bogomolova A., Ryazanova M. Balk I., *Cluster approach to analysis of publication titles*, Journal of Physics: Conference Series 1727, 2021, 012016 pp.
- [2] Kim, JM., Kim, NK., Jung, Y. et al., “Patent data analysis using functional count data model”, *Soft Comput.*, **23** (2019), 8815–8826
- [3] Traag V.A., Waltman L., van Eck N.J., “From Louvain to Leiden: guaranteeing well-connected communities”, *Scientific Reports*, **9** (2019).
- [4] Blondel V D, Guillaume J.L., Lambiotte R., Lefebvre E., “Fast unfolding of communities in large networks”, *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2008, 10008 pp.
- [5] Bogomolova A., Balk I., Semenov E., Ivaschenko N., “Network Analysis of Patenting Trends in Energy Efficiency”, *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, **317**:1 (2019), 012005 pp.



# Создание псевдоаннотированного обучающего корпуса для задачи разрешения лексической неоднозначности с помощью ансамбля моделей

А. С. Большина<sup>1</sup>

В настоящее время для задачи разрешения лексической неоднозначности наилучшие результаты на стандартных бенчмарках показывают алгоритмы, которые основаны на обучении с учителем. Однако, использование больших объемов размеченных данных для обучения таких моделей ограничивает их применение для языков с малым количеством ресурсов. Для русского языка также актуальна проблема нехватки аннотированных данных. В данной работе исследуется метод для автоматической разметки текстов, который основан на ансамбле моделей, предварительно обученных на синтетических данных. Результаты экспериментов демонстрируют, что модели, обученные на данных, размеченных предобученными моделями, показывают более высокое качество разрешения неоднозначности.

**Ключевые слова:** автоматическое разрешение неоднозначности; датасеты на русском языке; ELMo; BERT.

## 1. Введение

Задача автоматического разрешения неоднозначности состоит в определении корректного значения многозначного слова в том или ином контексте. Как и во многих других областях автоматической обработки текстов, в сфере разрешения неоднозначности остро стоит проблема недостатка размеченных данных. Для получения аннотированного корпуса необходимого для обучения размера требуется очень много времени и трудозатрат, поэтому последние достижения в области предсказания значений слов могут быть применены на практике лишь к языкам с достаточным количеством ресурсов. Русский язык относится к языкам с ограниченными ресурсами ввиду того, что для него нет больших обучающих коллекций с разметкой значений.

---

<sup>1</sup>*Большина Ангелина Сергеевна* — аспирант каф. теоретической и прикладной лингвистики филологического ф-та МГУ, e-mail: angelina\_ku@mail.ru.

*Bolshina Angelina Sergeevna* — Lomonosov Moscow State University PhD student, Philological Faculty, Department of Theoretical and Computational Linguistics, e-mail: angelina\_ku@mail.ru.

В последнее время для решения проблемы нехватки аннотированных данных специалисты обращаются к такой парадигме обучения как *weak supervision*, которая подразумевает обучение моделей на данных с неточными, зашумленными метками. Чаще всего такую разметку получают с помощью вручную заданных эвристик, внешних баз знаний, предсказаний предобученных классификаторов и т.п. Для автоматической аннотации значений слов в настоящей работе будет применяться ансамбль моделей, предварительно обученных на данных с метками низкого качества, которые также были получены с помощью автоматического метода.

В данном исследовании для создания синтетического датасета для первичного обучения моделей использовался метод, базирующийся на концепте однозначных родственных слов. Однозначные «родственники» – это слова или словосочетания, имеющие только одно значение и связанные каким-либо отношением с многозначным словом в семантической сети. Все методы, использующие данный концепт, основаны на заменах: для каждого значения многозначного слова выделяются однозначные родственные слова, затем в корпусе данные слова заменяются на ключевое неоднозначное слово, и все полученные предложения размечаются в соответствии со значением однозначного родственного слова. Существуют различные системы автоматической генерации обучающих данных, использующие концепт однозначных родственных слов ([1],[2],[3]), в текущей работе применялся алгоритм, описанный в [3]. Для того, чтобы оценить качество полученной с помощью ансамбля разметки, сравнивалось значение F1-меры базовых моделей, обученных на коллекции, собранной с помощью метода однозначных родственников слов, и F1-мера моделей, дообученных на новых данных. Пример однозначных родственников слов для многозначного слова *барометр* в значении «индикатор» приведены ниже:

1) *отправная точка* (когипоним), *движущая сила* (когипоним), *точка отсчета* (когипоним), *значимость* (когипоним), *мерило* (когипоним в 2-х шагах) . . . .

Коллекция, собранная с помощью метода однозначных «родственников», использовалась для обучения трех моделей: две из них используют предобученную модель ruBERT [4] от DeepPavlov, а другая базируется на языковой модели ELMo от RusVectores [5], обученной на корпусе «Тайга»<sup>1</sup>. Первая модель – это тонко настроенный (*fine-tuned*) ruBERT с выходным слоем, предназначенным для классификации последовательностей: линейный слой, получающий на вход конкатенированные представления ключевого слова с четырех последних слоев предобученного трансформера. Вторая модель (*context-gloss pair BERT*) базируется на идеях, описанных в [6] и [7]: с помощью модели ruBERT решалась задача

---

<sup>1</sup>[https://tatianashavrina.github.io/taiga\\_site/](https://tatianashavrina.github.io/taiga_site/)

классификации пар предложений, которые были представлены контекстом с ключевым многозначным словом и словарной дефиницией одного из его значений. Также, как и в работе [8], в настоящем исследовании для предсказания значения слова применялась логистическая регрессия, использующая эмбединги ELMo в качестве признаков.

## 2. Результаты

Для предсказания значений ключевых слов в корпусе предобученные модели использовались в ансамбле, так как синтетические данные, полученные с помощью метода однозначных родственных слов, могут содержать ошибки, и, соответственно, вносить шум в модель.

В данном исследовании также учитывалась степень «уверенности» каждой из моделей. Вероятностные предсказания логистической регрессии и модели fine-tuned ruBERT на валидационном датасете анализировались для выявления областей, где модели совершают наибольшее число ошибок. Для модели context-gloss pair BERT для каждого значения целевого слова рассматривалась разница между вероятностями правильного и неправильного класса, предсказанными для примеров из валидационной выборки. Если эта разница больше 0, значит модель предсказала правильную метку. Таким образом, в данном исследовании 0,25-квантиль положительных значений разницы считался порогом «уверенности» для модели context-gloss pair BERT. Чтобы получить окончательную метку класса из вероятностных оценок моделей, к ним применялась весовая функция. В предлагаемой системе каждое предсказание базового классификатора умножается на значение точности того или иного класса, полученное в ходе оценки модели на валидационном датасете. Затем все взвешенные результаты суммируются, и индекс максимальной вероятности возвращается в качестве конечной метки смысла для примера с целевым словом. Эта схема взвешивания позволяет учитывать только предсказания классификаторов с высокой степенью «уверенности».

Стоит также отметить, что в экспериментах применялись различные варианты разметки текстов: без использования принципа “One sense per discourse” [9] (вариант (а) – без аугментации (добавления) данных словарными дефинициями и примерами употребления слов, (б) – с аугментацией) и с применением данного принципа ((в) – без аугментации, (г) – с аугментацией). Результаты, полученные моделями, обученными на различных датасетах, приведены в таблице 1.

Результаты моделей, переобученных на новых текстах, которые были размечены ансамблями, показывают, что эта процедура улучшает качество моделей разрешения неоднозначности.

Таблица 1. Усредненные значения F1-меры для всех ключевых многозначных слов на валидационном датасете.

Датасет	ELMo LogReg	Fine-tuned BERT	Context-gloss pair BERT
Датасет, размеченный с помощью метода однозначных родственных слов	0.85	0.81	0.79
(а)	0.86	0.84	<b>0.87</b>
(б)	<b>0.86</b>	0.85	<b>0.86</b>
(в)	<b>0.87</b>	0.84	0.86
(г)	0.87	<b>0.88</b>	0.87

## Список литературы

- [1] Przybyła P., “How big is big enough? Unsupervised word sense disambiguation using a very large corpus”, *arXiv preprint arXiv:1710.07960*, 2017.
- [2] Mihalcea R., Moldovan D. I., “An Iterative Approach to Word Sense Disambiguation”, *In Proceedings of FLAIRS Conference*, 2000, 219–223.
- [3] Bolshina A., Loukachevitch N., “Generating training data for word sense disambiguation in Russian”, *In Proceedings of Conference on Computational Linguistics and Intellectual Technologies Dialog-2020*, 2020, 119–132.
- [4] Kuratov Y., Arkhipov M. Y., “Adaptation of deep bidirectional multilingual transformers for Russian language”, *In Proceedings of the International Conference “Dialogue 2019”*, 2019, 333–339.
- [5] Kutuzov A., Kuzmenko E., “WebVectors: a toolkit for building web interfaces for vector semantic models”, *In International Conference on Analysis of Images, Social Networks and Texts*, 2016, 155–161.
- [6] Huang L., Sun C., Qiu X., Huang X., “GlossBERT: BERT for word sense disambiguation with gloss knowledge”, *arXiv preprint arXiv:1908.07245*, 2019.
- [7] Kohli H., “Transfer learning and augmentation for word sense disambiguation”, *Advances in Information Retrieval*, 2021, 303–311.
- [8] Kutuzov A., Kuzmenko E., “To lemmatize or not to lemmatize: how word normalisation affects ELMo performance in word sense disambiguation”, *arXiv preprint arXiv:1909.03135*, 2019.
- [9] Gale W. A., Church K. W., Yarowsky D., “One sense per discourse”, *USA: Association for Computational Linguistics*, 1992, 233–237.

### The Creation of Pseudo-Annotated Data for Word Sense Disambiguation using Ensembles of Models Angelina Bolshina

Nowadays, supervised word sense disambiguation (WSD) algorithms attain the best results on the main benchmarks. However, large sense-tagged training sets are required for their training. This requirement

hinders the development of the word sense disambiguation systems for many low-resource languages, including Russian. To address the issue of the knowledge acquisition bottleneck in Russian, in this work we investigate the method for automatic text labelling that is based on the ensemble of weakly supervised WSD models. Our experiments demonstrated that the models retrained on the new pseudo-annotated data outperform the initial models.

*Keywords:* Word sense disambiguation; Russian dataset; ELMo; BERT.

## References

- [1] Przybyła P., “How big is big enough? Unsupervised word sense disambiguation using a very large corpus”, *arXiv preprint arXiv:1710.07960*, 2017.
- [2] Mihalcea R., Moldovan D. I., “An Iterative Approach to Word Sense Disambiguation”, *In Proceedings of FLAIRS Conference*, 2000, 219–223.
- [3] Bolshina A., Loukachevitch N., “Generating training data for word sense disambiguation in Russian”, *In Proceedings of Conference on Computational Linguistics and Intellectual Technologies Dialog-2020*, 2020, 119–132.
- [4] Kuratov Y., Arkhipov M. Y., “Adaptation of deep bidirectional multilingual transformers for Russian language”, *In Proceedings of the International Conference “Dialogue 2019”*, 2019, 333–339.
- [5] Kutuzov A., Kuzmenko E., “WebVectors: a toolkit for building web interfaces for vector semantic models”, *In International Conference on Analysis of Images, Social Networks and Texts*, 2016, 155–161.
- [6] Huang L., Sun C., Qiu X., Huang X., “GlossBERT: BERT for word sense disambiguation with gloss knowledge”, *arXiv preprint arXiv:1908.07245*, 2019.
- [7] Kohli H., “Transfer learning and augmentation for word sense disambiguation”, *Advances in Information Retrieval*, 2021, 303–311.
- [8] Kutuzov A., Kuzmenko E., “To lemmatize or not to lemmatize: how word normalisation affects ELMo performance in word sense disambiguation”, *arXiv preprint arXiv:1909.03135*, 2019.
- [9] Gale W. A., Church K. W., Yarowsky D., “One sense per discourse”, *USA: Association for Computational Linguistics*, 1992, 233–237.

# Автоматический анализ репродуктивных ценностей пользователей сети ВКонтакте

И. Е. Калабихина<sup>1</sup>, Н. В. Лукашевич<sup>2</sup>, Е. П. Банин<sup>3</sup>,  
К. В. Алибаева<sup>4</sup>

В работе исследуются мнения пользователей сети ВКонтакте о рождении детей. Собран датасет с разметкой мнений по трем классам позиций по отношению к шести темам, связанных с рождением детей и пронаталистской политикой. Выполнены эксперименты по автоматической классификации мнений. Лучшие результаты получены на основе применения нейросетевой модели BERT в формулировке NLI (Natural language Inference - вывод по тексту). Выявлено, что феномен сознательной бездетности активно представлен в сети, а многодетность остается слабо распространенной моделью поведения. В рамках пронаталистской политики важно формировать позитивное общественное мнение о родительстве, смягчать дефицит времени у родителей.

**Ключевые слова:** анализ мнений, классификация, BERT, ВКонтакте, репродуктивные ценности, пронаталистская политика.

## 1. Введение

Мнения пользователей социальных сетей по демографическим вопросам могут служить дополнительным источником информации в исследова-

---

<sup>1</sup>*Калабихина Ирина Евгеньевна* — заведующая кафедрой народонаселения, доктор экономических наук, экономический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, школа «Мозг, когнитивные системы, искусственный интеллект», e-mail: kalabikhina@econ.msu.ru.

*Kalabikhina Irina Evgenievna* — Head of the Department of Population, Doctor of Economic Sciences, Faculty of Economics, Lomonosov Moscow State University, School “Brain, cognitive systems, artificial intelligence”.

<sup>2</sup>*Лукашевич Наталья Валентиновна* — ведущий научный сотрудник, доктор технических наук НИВЦ МГУ имени М.В. Ломоносова, школа «Мозг, когнитивные системы, искусственный интеллект», e-mail: louk\_nat@mail.ru.

*Loukachevitch Natalia Valentinovna* — leading researcher, Doctor of Technical Sciences, Research Computing Center, Lomonosov Moscow State University School “Brain, cognitive systems, artificial intelligence”.

<sup>3</sup>*Банин Евгений Петрович* — инженер-исследователь. кандидат технических наук, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», e-mail: evg.banin@gmail.com.

*Banin Eugene Petrovich* — engineer-researcher, Phd, National Research Center “Kurchatov Institute”.

<sup>4</sup>*Алибаева Камилла Вилеровна* — студентка фак-та ВМК МГУ имени М.В. Ломоносов, e-mail: camalibi@yandex.ru.

*Alibaeva Kamila Vinerovna* — student, Computer Science department, Lomonosov Moscow State University.

ниях и разработке социально-демографической политики. В данном исследовании рассматриваются подходы к автоматическому извлечению и анализу мнений пользователей сети ВКонтакте по вопросам отношения к (не)рождению детей и мерам государственной поддержки семей в области рождаемости. В данной работе мы представляем специализированный датасет, с разметкой мнений пользователей о репродуктивном поведении (DOI 10.5281/zenodo.5561126). Мы анализируем особенности распределение оценок «за» и «против» по конкретным аспектам репродуктивного поведения и отношения к пронаталистской политике. Созданный датасет используется для решения двух задач классификации: классификации сообщений по релевантности изучаемых тем и позиции автора по теме. Для классификации сообщений используются классические методы машинного обучения, а также нейросетевая модель BERT.

Сбор данных осуществлялся на основе групп ВКонтакте, в названиях или описаниях которых явно присутствовали слова *чайлдфри* и *childfree* и их вариации (так называемые *антинаталисты*), и *группы*, в названиях или описаниях которых присутствовали ключевые слова *мама*, *мамочки*, *дети* (*пронаталисты*). Базы данных текстов таких групп: DOI 10.3897/porreson.5.e70786; DOI 10.3897/porreson.5.e70786. Для анализа были выбраны 6 тем, отражающих отношение пользователей к (не)рождению детей и их оценку мер, предпринимаемых государством для повышения рождаемости. Высказывания по темам извлекались по соответствующим ключевым словам: «Аборты» (аборт), «Бездетность» (*childfree*, *чайлдфри*, *бездетный*, *нет детей*, *без детей*), «Многодетность» (*многодетный*, *многодетность*, *много детей*), «Индивидуализм» (*в свое*, *эгоист*, *ответственность*, *для себя*, *личность*, *развиваться*, *эго*), «Родительские отпуска» (*декрет*, *отпуск*), «Материнский капитал» (*маткапитал*, *материнский капитал*, *выплаты*, *пособие*). В дополнение к теме «Бездетность» отдельно разрабатывалась тема «Индивидуализм» (в контексте «пожить для себя»). Выбор темы «Индивидуализм» основан на гипотезе мотивации сознательной бездетности – изменении системы ценностей, увеличения набора жизненных траекторий, конкуренция ценностей самореализации и семейных ценностей, рост индивидуализации и приоритетов саморазвития.

Высказывания пользователей были разделены на предложения. Предложения из собранной выборки размечались тремя аннотаторами – профессиональными демографами и лингвистами. Поскольку в каждом предложении могли обсуждаться несколько вопросов, то аннотатор каждое предложение размечал по всем шести темам. Расхождения в разметке аннотаторами решались путем голосования. В результате разметки было размечено 5413 предложений по 6 темам с классами разметки: «нерелевантно», «за», «против», «прочее».

Собранные данные показали превалирование оценок «за» по теме «Аборты», что связано с отношением населения к аборту как к приемлемому средству регулирования рождаемости. По теме «Бездетность» было выявлено превалирование позитивных оценок, что связано с тем, что сторонники этого паттерна достаточно эмоциональны, и тема активна в период роста представителей такой модели. Тем же можно объяснить и превалирование позитивных оценок в теме «Индивидуализм». Негативные оценки в отношении детских и семейных пособий и родительских отпусков связаны либо с неготовностью публики поддерживать родительство собственными ресурсами (налоги, рабочее время, хлопоты с сотрудниками-родителями), либо с персональными трудностями воспитания маленьких детей, дефицитом времени и запросом на большую помощь со стороны государства.

## 2. Сбор и разметка данных

В исследовании рассматривались две задачи классификации: классификация высказываний на релевантные/нерелевантные и классификация релевантных высказываний на три класса тональности позиций. Классификация сообщений по релевантности важна, поскольку сообщения извлекались не по хэштегам, а по ключевым словам, которые не всегда точно характеризуют тему сообщений. В качестве базовых моделей используются классические методы машинного обучения: наивный байесовский классификатор в двух вариантах мультиномиальный (MNB) и Бернулли (BNB), метод опорных векторов (SVC), Gradient Boosting (GB), Случайный лес (Random Forest).

В качестве основного метода использовалась нейросетевая модель BERT [1], в версии Conversational RuBERT, для создания которой использовалась русскоязычная модель RuBERT [2], которая была дообучена на русскоязычных диалогах и текстах социальных сетей. Использовались три варианта обучения модели BERT: классификация целевого высказывания, а также так называемые NLI (Natural Language Inference – вывод по тексту) и QA (question-answering – вопросно-ответный) подходы (Sun et al., 2019). В NLI и QA подходах модель получала пары (текст, предположение). Для классификации релевантности NLI и классификации тональности QA этим предположением был сам аспект («Аборты», «Выплаты» и тд), для классификации тональности NLI предположение включало в себя еще и саму тональность («Негативно к абортам», «Нейтрально к выплатам» и т.д.). В работе использовались реализации классических методов машинного обучения из пакета scikit-learn. Обучение алгоритмов производилось на основе векторных представлений предложений с весами tf-idf. Для настройки параметров алгоритмов исполь-



зовалась процедура grid-search на валидационных данных. Лучшие результаты по разным темам для классических подходов были получены на основе методов: Байесовский классификатор Бернулли (BNB), метод опорных векторов (SVC) и Gradient Boosting (GB). Для оценки качества классификации используются меры: правильность классификации (Accuracy) и F-мера. Лучшие результаты классификации получены моделью BERT NLI [3], обученной на парах предложений, обучение выполнено на полной выборке для каждой темы. Следующие по качеству результаты получены моделью NLIsingle, которая для каждой темы обучалась только на обучающих данных своей темы – 66.15 Accuracy, 65.58 Macro F-меры.

### 3. Заключение

В данной работе представлены результаты анализа высказываний пользователей сети ВКонтакте по тематике деторождения и отношения к пронаталистской политике. Собран новый датасет, размеченный по отношению пользователей к шести темам. На собранных данных были исследованы две задачи, существенные для анализа мнений в социальных сетях в реальном времени: классификация высказываний по релевантности и классификаций релевантных мнений по тональности позиции. В обеих задачах лучшие результаты получены на основе варианта модели NLI BERT, на вход которой данные подаются в виде двух предложений, и обучение для классификации по конкретным темам производится на всем объеме обучающих данных. Выявлено, что феномен сознательной бездетности активно представлен в сети, а многодетность остается слабо распространенной моделью поведения. В контексте полученных данных можно сделать вывод о некоторых рекомендациях в отношении пронаталистской политики: формировать позитивное общественное мнение о родительстве и родителях, смягчать дефицит времени у родителей.

### Благодарности

Работа выполнена в рамках НИР «Воспроизводство населения в контексте социально-экономического развития»: «Паттерны репродуктивного поведения россиян (на основе тематического анализа текстов в социальных сетях)».

## Список литературы

- [1] Devlin J. et al., “BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding”, *NAACL HLT 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies*, **1** (2019), 4171—4186.
- [2] Kuratov Y., Arkhipov M., “Adaptation of deep bidirectional multilingual transformers for Russian language”, *Komp’juternaja Lingvistika i Intellektual’nye Tehnologii*, 2019, № 18, 333—339.
- [3] Sun C., Huang L., Qiu X., “Utilizing BERT for aspect-based sentiment analysis via constructing auxiliary sentence”, *NAACL HLT 2019 - 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies - Proceedings of the Conference. Association for Computational Linguistics (ACL)*, **1** (2019), 380—385.

### **Automated Analysis of Family Values of VKontakte Users Kalabikhina I.E., Loukachevitch N.V., Banin E.P., Alibaeva K.V.**

The paper examines opinions of VKontakte network users about having births. A dataset annotated with opinions on three classes of positions towards six childbirth-related topics. Experiments on automatic classification of opinions have been carried out. The best results were obtained using neural network model BERT in the formulation of NLI (Natural language Inference). It was revealed that the phenomenon of conscious childlessness is actively represented in the network, while having many children remains a poorly widespread model of behavior. Within the framework of a pro-natalist policy, it is important to support a positive public opinion about parenting, to develop family-life balance for parents.

*Keywords:* stance detection, classification, BERT, VKontakte, reproductive values, pro-natalist policy.

## References

- [1] Devlin J. et al., “BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding”, *NAACL HLT 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies*, **1** (2019), 4171—4186.
- [2] Y. Kuratov Y., Arkhipov M., “Adaptation of deep bidirectional multilingual transformers for Russian language”, *Komp’juternaja Lingvistika i Intellektual’nye Tehnologii*, 2019, № 18, 333—339.

- [3] Sun C., Huang L., Qiu X., “Utilizing BERT for aspect-based sentiment analysis via constructing auxiliary sentence”, *NAACL HLT 2019 - 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies - Proceedings of the Conference. Association for Computational Linguistics (ACL)*, **1** (2019), 380–385.

# Три аспекта непротиворечивости языковых данных: оценка и интерпретация

Е. А. Лютикова<sup>1</sup>, А. А. Герасимова<sup>2</sup>, Д. Д. Белова<sup>3</sup>,  
К. А. Студеникина<sup>4</sup>, А. С. Лютиков<sup>5</sup>

В последнее время при сборе эмпирических данных о языковых структурах исследователи все чаще обращаются к методу извлечения суждений о приемлемости языкового выражения. Характерная особенность этого метода – неоднородность суждений носителей языка. В работе мы рассмотрим возможные источники неоднородности и предложим способы ее измерения и интерпретации.

**Ключевые слова:** грамматика, приемлемость, последовательность, оценки грамматичности.

## 1. Проблема

Задача моделирования лингвистических явлений неразрывно связана с проблемой разграничения условно «правильных» и «неправильных» языковых выражений. Идеальная языковая модель должна уметь порождать грамматически правильные предложения, но не допускать при этом порождения неграмматичных структур. Однако сведения о правильности языковых структур могут быть получены лишь косвенным

---

<sup>1</sup>Лютикова Екатерина Анатольевна — профессор филол. ф-та МГУ, e-mail: lyutikova2008@gmail.com.

Lyutikova Ekaterina Anatolyevna — professor, Philological Faculty, Lomonosov Moscow State University.

<sup>2</sup>Герасимова Анастасия Алексеевна — младший научный сотрудник НИВЦ МГУ им. Ломоносова, email: anastasiagerasimova432@gmail.com.

Gerasimova Anastasia Alekseevna — junior researcher, Laboratory for Computational Lexicography, Research Computing Center, Lomonosov Moscow State University.

<sup>3</sup>Белова Дарья Дмитриевна — студентка магистратуры филол. ф-та МГУ, email: dd.belova@yandex.ru.

Belova Daria Dmitrievna — MA student, Philological Faculty, Lomonosov Moscow State University.

<sup>4</sup>Студеникина Ксения Андреевна — студентка магистратуры филол. ф-та МГУ, email: xeanst@gmail.com.

Studenikina Ksenia Andreevna — MA student, Philological Faculty, Lomonosov Moscow State University.

<sup>5</sup>Лютиков Александр Сергеевич — студент бакалавриата ФКН НИУ ВШЭ, email: lyutiko.alex@gmail.com.

Lyutikov Aleksandr Sergeevich — BA student, Faculty of Computer Science, Higher School of Economics.

образом: либо интроспективно, либо посредством опроса носителей языка. Проблема отсутствия непосредственного доступа к языку осложняется поведенческой стороной языковой деятельности. Грамматическая правильность является лишь одним из лингвистических факторов, которые определяют приемлемость предложения, наряду с факторами употребления: частотностью слов, длиной предложения, его сложностью, семантической сочетаемостью слов и проч. На лингвистические аспекты приемлемости накладывается проблема неоднородности суждений, связанной с индивидуальными особенностями носителей языка: однотипные языковые выражения носители могут оценивать как более или менее приемлемые, причем варьирование возможно как в оценках различных носителей, так и в оценках одного индивида. В связи с подобной вариативностью суждений возникает вопрос: можно ли доверять оценкам приемлемости и использовать их в качестве эмпирической базы для построения языковых моделей?

## 2. Содержание исследования

Для ответа на данный вопрос мы оценим непротиворечивость языковых данных, получаемых от носителей языка. Мы выделяем три аспекта непротиворечивости. Во-первых, между носителями должна наблюдаться *согласованность*: разные индивиды сходным образом реагируют на определенные условия. Во-вторых, индивид должен быть последователен в собственных реакциях на языковые выражения, поскольку обладает целостным представлением о грамматике родного языка (*индивидуальная последовательность*). В-третьих, поведение индивида не должно отличаться при смене речевого модуса – при порождении и понимании. Грамматика едина, поэтому мы ожидаем, что оценки языковых выражений совпадают с тем, как человек говорит (*индивидуальная устойчивость*).

## 3. Материалы исследования

Чтобы проверить наши предположения о последовательности носителей языка, мы провели серию экспериментальных исследований на материале трех конструкций, демонстрирующих вариативность в русском языке: (i) отрицательные конструкции с инфинитивными оборотами, содержащими отрицательное местоимение (*никто, ничто*); (ii) согласование с существительными, обозначающими человека по профессии и не имеющими женской родовой параллели (*директор, менеджер*); (iii) падежное оформления прилагательного в конструкциях с малыми числительными

(*два, три, четыре*). На материале вариативности (i) мы провели анализ согласованности разных индивидов и индивидуальной последовательности, на материале явлений (ii) и (iii) мы проанализировали устойчивость грамматики индивидов в двух модусах: при порождении и при понимании. Выбор феноменов обусловлен, с одной стороны, существованием в каждом случае нескольких допустимых вариантов одной конструкции, с другой – возможностью провести на данном материале контролируемый лингвистический эксперимент. Так, в конструкциях (i) есть три варианта позиции отрицательного местоимения, каждый из которых допустим (1) [1], [2]; в случае (ii) допустимо два вида согласования, грамматическое по мужскому роду и семантическое по женскому роду (2) [3], [4]; для феномена (iii) прилагательное может принимать две формы – именительного и родительного падежа (3) [5], [3]. Мы провели серию лингвистических экспериментов. В экспериментах на понимание задание респондентов заключалось в том, чтобы оценить предложение по шкале от 1 до 7. В эксперименте на порождение нужно было дополнить предложения путем раскрытия скобок. В экспериментах по явлению (i) приняли участие 128 человек, в экспериментах (ii) и (iii) участвовали 106 респондентов.

## 4. Метрики

I. Для анализа *согласованности* ответов респондентов мы провели анализ мощности эксперимента для подгрупп респондентов, выбранных по социолингвистическим параметрам. Скорость достижения максимальной мощности, посчитанная с применением множественных симуляций выборок, позволяет охарактеризовать выборки с точки зрения вероятности обнаружить различие между условиями в рамках конкретного эксперимента.

II. Также для анализа *согласованности* мы установили, как каждый из респондентов ранжировал три рассматриваемых условия на шкале приемлемости. Мы получили индивидуальные наборы рангов условий, и сопоставили их с эталонным набором (по всей выборке) при помощи коэффициента ранговой корреляции  $\tau$  Кендалла.

III. Далее, мы оценили *последовательность* оценок: насколько оценки респондента для одного и того же условия варьировали по мере прохождения эксперимента. Мы предположили, что индивидуальные мнения о конкретном типе конструкций могут меняться на протяжении эксперимента, но диапазон варьирования для разных условий отличается несущественно. Поэтому устойчивость ответов респондентов оценивалась через среднее стандартное отклонение в ответах для каждого условия.

IV. Для оценки *устойчивости* учитывалось: а) какой вариант респондент использовал в эксперименте на порождение; б) какой из вариантов респондент в среднем оценил как более приемлемый. Подобная метрика позволяет выделить три стратегии ответа (см. Таблицу 1).

## 5. Результаты

1) Анализ согласованности респондентов показал, что около 45% респондентов ранжировали три рассматриваемых условия на шкале приемлемости с коэффициентом ранговой корреляции  $\tau = 1$  и  $\tau = 0.8$ , что задает основную тенденцию выборки. 23% респондентов имеют отрицательное значение коэффициента. 2) Существенные отличия наблюдаются для различных социолингвистических групп. В частности, анализ мощности показал, что при наименьшем объеме выборки максимальная мощность достигается для респондентов в возрасте от 15 до 20 лет. 3) Большая часть респондентов (76%) демонстрируют средний уровень индивидуальной последовательности (среднее стандартное отклонение в ответах внутри условий варьирует от 1 до 2 по шкале 1-7). Строго последовательны в своих суждениях меньше 10% респондентов (варьирование в 1 балл). 4) Респонденты последовательны при переходе между модальностями в среднем в половине случаев; при этом последовательность различается для разных типов феноменов.

## 6. Выводы

В результате исследования мы предложили способы измерить последовательность индивидов при вынесении суждений о языковом материале. Мы показали, что несмотря на то, что большая часть ответов индивидов формирует общую тенденцию выборки, мы наблюдаем отклонения от общей тенденции. Такой результат показывает важное свойство языкового материала – его многовариантность. При этом варьирование неслучайно и происходит в ограниченном диапазоне (ср., например, данные об *индивидуальной последовательности*). (Не)последовательность респондентов в различных модальностях мы связываем с типом исследуемых явлений: наблюдаемые несоответствия отражают разные стадии развития одного из вариантов.

При построении компьютерных моделей языка имплицитно предполагается единство и стабильность грамматики. В действительности мы сталкиваемся не с одной идеальной грамматикой, а со множеством идиолектов, которые складываются в отдельные языковые профили носителей языка. Фактически мы имеем дело со множеством грамматик, ко-

торые развиваются и влияют друг на друга. Важная задача современной лингвистики – учитывать это внутриграмматическое варьирование и задавать такие параметры языковой модели, которые могли бы его допускать. Итак, мы не только делаем вывод о допустимости такой вариативности при использовании данных суждений в качестве эмпирической базы для построения языковых моделей, но считаем учет его необходимым для развития научных представлений о языке.

	Согласование по роду (ii)	Малые числительные (iii)
<b>Стратегия А.</b> Вариант, используемый при порождении, оценивается как наиболее приемлемый	57%	39%
<b>Стратегия Б.</b> В одном эксперименте используются/оцениваются как приемлемые обе альтернативы, в другом эксперименте предпочтение отдается какому-то одному варианту	30%	37%
<i>Оба варианта использованы при порождении</i>	14%	23%
<i>Оба варианта равно приемлемы по оценкам</i>	16%	14%
<b>Стратегия В.</b> В двух экспериментах предпочитают различные варианты.	13%	24%

Таблица 1. Устойчивость ответов респондентов.

*Примечание.* В ячейках таблицы – процент случаев, когда респондент проявил то или иное поведение относительно экспериментального условия.

(1) а. Келдыш требовал, чтобы космонавты **ничего не** говорили об отказе автоматической системы... [НКРЯ]

б. Мать Виолетты **не** хочет **ничего** делать... [НКРЯ]

с. Я **не** хочу печалить Вас **ничем**. [НКРЯ]

(2) а. Это Цветкова – эта **толстая врач** – **сказала!** [НКРЯ]

б. ... я спросила ее: как же она так легко отважилась на порочный кадровый шаг, **властный директор** **ответила** с обезоруживающей улыбкой.



вающей женской непосредственностью... [НКРЯ]

(3) а. Как и положено, победителей ожидают **три наградных номинации** — бронзовая, серебряная и золотая. [НКРЯ]

б. Все **три опытные спортсменки** потерпели фиаско на отборе. [НКРЯ]

## Список литературы

- [1] Падучева Е.В., *Русское отрицательное предложение*, «ЯСК», Москва, 2013.
- [2] Корнакова Е.В., Лютикова Е.А., Градченков П.В., “Лицензирующие свойства отрицания в русском языке”, *Rhema. Рема*, 4 (2016), 58–85.
- [3] Pesetsky D., *Russian case morphology and the syntactic categories*, «MIT Press», Cambridge, MA, 2013.
- [4] Лютикова Е.А., “Согласование, признаки и структура именной группы в русском языке”, *Русский язык в научном освещении*, 30 (2015), 44–74.
- [5] Шкапа М.В., *Согласование определения с существительным при числительных два, три, четыре*, Проблемы русской стилистики по данным НКРЯ, 2011, [https://studiorum.ruscorpora.ru/stylistics/syntax\\_numeral/](https://studiorum.ruscorpora.ru/stylistics/syntax_numeral/).

### Three aspects of linguistic data consistency: estimation and interpretation

**Lyutikova E., Gerasimova A., Belova D., Studenikina K., Lyutikov A.**

Acceptability judgments have become the key method to obtain empirical base for theoretical language modelling and rule-based NLP. A signature property of this method is heterogeneity of speakers' judgments. In this talk we will consider its possible sources. We will present metrics elaborated to measure this heterogeneity and ways to interpret it.

*Keywords:* grammar, acceptability, consistency, grammaticality judgments.

## References

- [1] Paducheva, E.V., *Russkoe otritsatel'noe predlozhenie [Russian negative sentence]*, Yazyki slavyanskoi kul'tury, Moscow, 2013 (In Russian).
- [2] Kornakova, E.V., Lyutikova E.A., Grashchenkov P.V., “Licensing properties of Russian negation.”, *Rhema*, **4** (2016), 58–85 (In Russian).
- [3] Pesetsky D., *Russian case morphology and the syntactic categories*, «MIT Press», Cambridge, MA, 2013.
- [4] Lyutikova, E., “Features, agreement, and structure of the Russian noun phrase”, *Russkii yazyk v nauchnom osveshchenii*, **30** (2015), 44–74 (In Russian).
- [5] Skapa, M.V., *Soglasovanie opredeleniya s sushchestvitel'nykh pri chislitel'nykh dva, tri, chetyre [Agreement between an adjective and a noun within numerals dva, tri, chetyre]*, Problemy russkoi stilistiki po dannym NKRYa, 2011 (In Russian), [https://studiorum.ruscorpora.ru/stylistics/syntax\\_numeral/](https://studiorum.ruscorpora.ru/stylistics/syntax_numeral/).

# Семантический анализ некоторых типов предложений Правил дорожного движения

М. И. Менькин<sup>1</sup>

Данная работа относится к области автоматической обработки юридических документов и посвящена семантическому анализу Правил дорожного движения. Описаны основные этапы семантического разбора предложений типа «Уступить дорогу» и «Запрещено». Используя синтаксические шаблоны, мы ограничиваем поиск и реализуем синтаксический и семантический анализ этих предложений.

**Ключевые слова:** семантический анализ, синтаксический анализ, юридический документ, правила дорожного движения.

## 1. Введение

Существует задача автоматической обработки текстов юридических документов. По сравнению с произвольным текстом на естественном языке (ЕЯ) структура текста юридического документа более-менее определена, т.е. существует регламент по оформлению таких документов, есть конкретный набор используемых лексем с определённым значением, есть регулярность в синтаксисе однотипных предложений и т.д. А среди юридических документов есть такие, которые по своей сути являются алгоритмом, записанным на ЕЯ и формализованным с юридической точки зрения. В качестве примеров здесь можно привести документы по бухгалтерскому учёту (семантическим анализом которых занимался Евгений Перпер [1]) или документ, касающийся правил дорожного движения — Постановление Правительства РФ «О правилах дорожного движения» (ПДД) [2].

Одна из наших главных задач заключается в построении формальной модели юридического документа [2]. Актуальность работы можно сформулировать следующим образом:

- Если есть формальная модель юридического документа, то появляется возможность отвечать на вопросы, сформулированные на ЕЯ.

---

<sup>1</sup>Менькин Михаил Игоревич — м.н.с. каф. математической теории интеллектуальных систем мех.-мат. ф-та МГУ, e-mail: mihail\_mn@inbox.ru.

Menkin Mikhail Igorevich — junior researcher, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Mechanics and Mathematics, Chair of Mathematical Theory of Intellectual Systems.

Вопросы будут переводиться на язык этой же формальной модели. Для ПДД такой формальной моделью является модель дорожных ситуаций [3], [4], а примерами вопросов могут являться вопросы из экзамена на знание ПДД.

- Если есть формальная модель юридического документа, то мы сможем выполнить проверку текста юридического документа на непротиворечивость. Также, если мы захотим внести изменения в существующий текст или добавить новые предложения, то можно будет проверить противоречат ли внесённые изменения старому тексту или нет. Такая ситуация возникает когда выходит новая редакция юридического документа. Для ПДД проверка на непротиворечивость заключается в разрешении новых дорожных ситуаций без противоречий между разными пунктами текста документа.

Стоит отметить, что юридические тексты с алгоритмом внутри себя должны пониматься одинаково каждым читающим, т.е. семантика документа не должна зависеть от читающей интеллектуальной системы. Это используется для разработки модели семантики документа (первый этап семантического анализа документа) и, в дальнейшем, алгоритма «текст документа» → «модель семантики документа» (второй этап семантического анализа).

Данная работа продолжает исследование, начатое в [3], [4].

## 2. Типы предложений и синтаксические шаблоны

Относительно поставленной задачи можно считать, что все предложения в тексте [2] разбиваются на 3 класса: предложения–определения (необходимы для формирования модели семантики закона, например пункт 1.4. «На дорогах установлено правостороннее движение транспортных средств»), предложения–правила (собственно правила, записанные на ЕЯ, например пункт 17.3. «При выезде из жилой зоны водители должны уступить дорогу другим участникам движения»), мусорные предложения (предложения, удаление которых из текста не изменяет семантику предложений первых двух классов, например, такой текст из пункта 1.1.1: «абзац исключен. - Постановление Правительства РФ от 12.11.2012 N 1156»).

Такие классы предложений есть в любом содержательном документе, имеющем внутри себя алгоритмическую составляющую.

Для разбора предложений используются синтаксические шаблоны. Под *синтаксическим шаблоном* мы понимаем синтаксический граф, где каждая вершина представляет собой четвёрку «лемма», «синтаксическая

роль», «семантический класс», «ярус вершины». Наличие в синтаксическом шаблоне яруса и семантического класса избыточно, но служит для дополнительной проверки.

Возьмём пример из [4]. Предложения с манёвром «Уступить дорогу» имеют один из следующих синтаксических шаблонов (+ означает смежность вершин):

- (должен / должны, сказ., MODAL, 0) + (уступить, прям.доп., TO\_CEDE, 1) + (дорогу, прям.доп., ROAD, 2);
- (обязан, сказ., TO\_OBLIGE, 0) + (уступить, прям.доп., TO\_CEDE, 1) + (дорогу, прям.доп., ROAD, 2);
- (имеет, сказ., EXISTENCE\_AND\_POSSESSION, 0) + (преимущество, прям.доп., CH\_BENEFIT, 1).

Помимо этих синтаксических шаблонов, для предложений с манёвром «Уступить дорогу» есть наборы синтаксических шаблонов «КТО УСТУПАЕТ», «КОМУ УСТУПИТЬ», «СИТУАЦИЯ» [4]. Для предложений типа «Запрещено» есть наборы «СИТУАЦИЯ» (совпадает с предыдущим) и «МАНЁВР».

### 3. Процедуры алгоритма семантического анализа

Автоматическая обработка касается только предложений–правил. Выбираем те предложения, которые содержат ключевые слова «Уступить» и «Запрещено», т.к. среди предложений–правил их много.

Процедуры алгоритма семантического анализа:

- 1) Ищем предложения, содержащие ключевые слова, т.е. те, которые необходимо присутствуют в синтаксических шаблонах (в нашем случае «уступить» и «запрещено»); проверяем правильность синтаксической роли по соответствующему синтаксическому шаблону;
- 2) По каждому предложению из п.1 проверяем наличие каждого синтаксического шаблона;
- 3) По синтаксическому шаблону, который отвечает за манёвр, определяем вид и количество шаблонов правил (см. [4])
- 4) По синтаксическим шаблонам «СИТУАЦИЯ» определяем свойства участков дорог в шаблоне правила;
- 5) Для предложений типа «Уступить»: по синтаксическим шаблонам «КТО УСТУПАЕТ» и «КОМУ УСТУПИТЬ» определяем расположение и свойства транспортных средств.

## 4. Заключение

На текущий момент создано около 80% синтаксических шаблонов для предложений типа «Уступить дорогу» и «Запрещено». Для нескольких простых предложений получены шаблоны правил. Получение шаблонов правил по предложениям, которые полностью разобраны по синтаксическим шаблонам, осложняется неоднозначностью отображений вершин графов, т.к. в шаблоне правила всегда 9 или менее вершин, в то время как в графе дороги их количество не ограничивается.

Автор выражает благодарность Гасанову Эльяру Эльдаровичу за постановку задачи. Для проведения синтаксического разбора предложений в работе использовались технологии NLP компании АБВУУ [5], [6], любезно предоставленные Дмитрием Черноусом.

## Список литературы

- [1] Перпер Е.М., Гасанов Э.Э., Кудрявцев В.Б., “О семантическом анализе юридических текстов”, *Интеллектуальные системы*, **22:3** (2018), 45–88.
- [2] “Постановление Правительства РФ от 23.10.1993 N 1090 (ред. от 04.12.2018) «О правилах дорожного движения»”, *Консультант-Плюс*.
- [3] Менькин М.И., “Объектная модель правил дорожного движения”, *Интеллектуальные системы*, **23:1** (2019), 39–53.
- [4] Менькин М.И., “Автоматический перевод правил дорожного движения в теоретико-графовую формальную модель”, *Интеллектуальные системы*, **23:3** (2019), 7–31.
- [5] “АБВУУ InfoExtractor Demo”, <http://parsertest.abbyy.com/ru/>.
- [6] “Онтология Linguistic (АБВУУ)”, [http://comprenoservice.abbyy.com/help/ru/ontologies\\_linguistic\\_linguistic.html](http://comprenoservice.abbyy.com/help/ru/ontologies_linguistic_linguistic.html).

### **Semantic analysis of some types of sentences of Road Traffic Law Menkin M.I.**

The present paper is all about legal document processing and deals with semantic analysis of Road Traffic Law. We describe the basic procedures for semantic analysis of «Give way» and «Prohibitive»

types of sentences. We circumscribe search and implement parsing and semantic analysis of these sentences using syntactic patterns.

*Keywords:* semantic analysis, syntactic analysis, legal document, rules of the road.

## References

- [1] Perper E.M., Gasanov E.E., Kudryavtsev V.B., “On the semantic analysis of juridical documents”, *Intelligent systems*, **22**:3 (2018), 45–88 (In Russian).
- [2] “Russian Government Decree of 23.10.1993 N 1090 (04.12.2018) «About Traffic Rules»”, *ConsultantPlus* (In Russian).
- [3] Menkin M.I., “Objects model of rules of the road”, *Intelligent systems*, **23**:1 (2019), 39–53 (In Russian).
- [4] Menkin M.I., “Auto-translation of rules of the road to formal graph-theoretic model”, *Intelligent systems*, **23**:3 (2019), 7–31 (In Russian).
- [5] “ABBYE InfoExtractor Demo”.  
<http://parsertest.abby.com/ru/> (In Russian).
- [6] “Ontology «Linguistic» (ABBYE)”, [http://comprenoservice.abby.com/help/ru/ontologies\\_linguistic\\_linguistic.html](http://comprenoservice.abby.com/help/ru/ontologies_linguistic_linguistic.html) (In Russian).

Часть 5.  
Искусственные нейронные сети и  
машинный интеллект



# Решение задачи классификации с помощью интерференционной модели нейронной сети

Н. А. Бабич<sup>1</sup>

Классические искусственные нейронные сети имеют ряд недостатков. Для устранения этих недостатков предлагается принципиально новая модель искусственной нейронной сети, названная интерференционной моделью. Она основана на строении биологических нейронов головного мозга человека. Данная работа описывает структуру и принципы работы интерференционной модели на примере решения задачи классификации данных. Результаты работы показывают, что интерференционная модель не содержит недостатков классических ИНС и хорошо подходит для решения задачи классификации, а также для распознавания образов.

**Ключевые слова:** нейронная сеть, интерференционная модель, интерференция, классификация данных, нейромедиатор, синапс, рецептор, распознавание образов.

## 1. Введение

Классические искусственные нейронные сети, такие как, например, многослойный персептрон, свёрточные нейронные сети, имеют ряд недостатков. Для обучения нейронных сетей обычно необходимо большое количество данных (а, следовательно, и время), они обладают большим количеством параметров, а процесс их изменения зачастую не является наглядным, что усложняет реализацию нейронной сети для решения той или иной практической задачи, а также их чаще всего нельзя дообучать [1], [2].

Интерференционная модель принципиально отличается от классических моделей нейронных сетей. Описание главных структурных элементов модели нейрона можно разделить на четыре составляющих: описание процесса выделения нейромедиатора синапсами и его влияния на рецепторы, описание свойств перемещения рецепторов, описание условий генерации выходного импульса нейрона (спайка), описание критерия расхождения запомненной информации и той, которая поступает на ней-

---

<sup>1</sup>*Бабич Николай Александрович* — аспирант (стажёр-исследователь), Институт проблем машиноведения Российской академии наук, e-mail: nickware@mail.ru.

*Babbysh Nikolay Aleksandrovich* — PhD student, Russian academy of Sciences, Institute of machine science problems.

рон после обучения [3]. Рассмотрим процессы обучения и распознавания сигналов.

Графическое представление процесса обучения нейрона на примере сигнала, состоящего из двух импульсов, отображено на рисунке 1. Нейрон интерференционной модели может содержать десятки синапсов и рецепторов, но для наглядности рассмотрим два синапса и один рецептор.

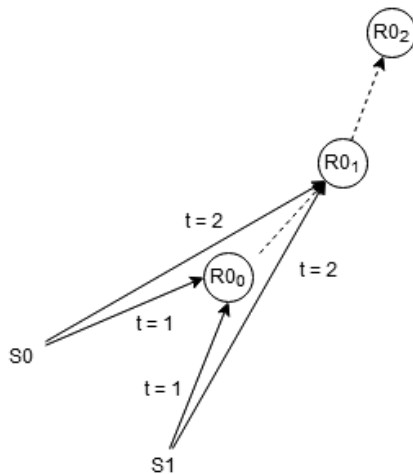


Рис. 1. Графическое представление процесса обучения нейрона

Здесь  $S_0$  и  $S_1$  – синапсы, выделяющие нейромедиатор, а  $R_0$  – рецептор, реагирующий на него. Когда импульс поступает на вход нейрона на первом такте ( $t = 1$ ), синапсы выделяют определённое количество нейромедиатора, что вызывает смещение рецептора с начальной позиции  $R_{00}$  на позицию  $R_{01}$ . Когда на нейрон поступает второй импульс ( $t = 2$ ), происходит тоже самое, рецептор смещается на некоторую конечную позицию  $R_{02}$  и, поскольку обучение закончено, он закрепляется там, координаты сохраняются. Такой рецептор называется эталонным, потому что в дальнейшем его координаты будут использоваться для вычисления критерия расхождения при распознавании всех других сигналов, поступающих на нейрон после завершения процесса обучения.

При распознавании сигнала используются виртуальные копии рецепторов. Такие рецепторы называются фантомными, поскольку их координаты используются только для сравнения сигналов в конечный момент времени и не сохраняются. Таким образом, критерием расхождения может быть принято среднее расстояние от эталонных рецепторов до фантомных. На рисунке 2 графически изображён процесс распознавания та-

кого же сигнала из двух импульсов, но отличающегося от обучающего.  $R0'$  – рецептор, в начальный момент времени координаты которого совпадают с координатами  $R0$  ( $R0'_0 = R0_0$ ).

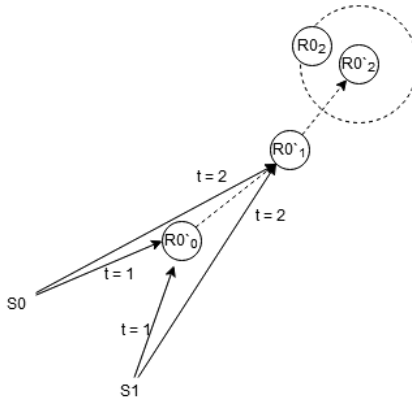


Рис. 2. Графическое представление процесса обучения нейрона

На первом и последующих тактах происходит всё тоже самое, что и при обучении нейрона – импульс поступает на синапсы, они выделяют нейромедиатор, рецептор смещается. Но поскольку сигнал несколько отличается от того, который использовался для обучения нейрона, траектория движения рецептора изменилась. В конечный момент времени (после импульса на втором такте) фантомный рецептор занимает позицию  $R0_2$ , которая отличается от позиции эталонного рецептора ( $R0_2$ ). Чтобы понять, насколько велики эти различия, необходимо вычислить значение критерия расхождения. Устанавливая некоторое пороговое значение, означающее допустимую степень отклонения, можно принимать решение о том, является ли распознанный сигнал того же класса, что и тот, которому был обучен нейрон.

При объединении нейронов в сеть за один класс сигналов может отвечать один или группа обособленных нейронов (ансамбль). В этом случае классификация будет осуществляться путём подачи на обученные нейроны или ансамбли нейронов распознаваемого сигнала и расчёта критерия расхождения для них. Класс распознаваемого сигнала соответствует тому классу, нейрон (ансамбль нейронов) которого имеет наименьшее значение критерия расхождения.

Таким образом, интерференционная модель отлично подходит для решения задач классификации данных. Экспериментальные исследования показывают, что она имеет ряд достоинств над классическими нейронными сетями: требуется меньшее количество данных для обучения

(зачастую достаточно всего одного образца на класс, чтобы сеть смогла распознавать данные), имеет меньшее количество изменяемых параметров и обладает наглядностью при их изменении, имеет возможность дообучаться, а также имеет архитектурную возможность распараллелить вычисления относительно нейронов и даже рецепторов. Модель может заменять и свёрточные нейронные сети, так как она может быть использована для распознавания образов, что открывает новые возможности при решении прикладных задач, таких как, например, динамический анализ данных в системе реального времени или диагностика отклонений в работе мозга по сигналам ЭЭГ[4] [5].

Интерференционная модель реализована в виде открытой свободно-распространяемой C++ библиотеки Interference [6]. Она позволяет создавать, обучать и применять нейронные сети к решению практических задач, а также поддерживает параллельные вычисления, что позволяет ускорять вычислительные процессы на многоядерных системах.

## **Data classification using interferential neural network model Babbysh N.A.**

Classical models of artificial neural networks have several disadvantages. To eliminate these shortcomings, a fundamentally new model of an artificial neural network, called the interferential model, is proposed. This model is based on the structure of biological neurons of the human brain. This work describes principles of work of interferential model. The results of the work show that the interferential model does not contain the disadvantages of classical neural networks. It is well suited for running classification task, as well as for pattern recognition.

*Keywords:* neural network, interferential model, interference, data classification, neurotransmitter, synapse, receptor, image recognition.

## **References**

- [1] Simon Haykin, “Neural Networks: A Comprehensive Foundation Second Edition”, *Neural Networks*, 2018, 1104.
- [2] Sakshi Indolia, Anil Kumar Goswami, S.P. Mishra, Pooja Asopa, “Conceptual Understanding of Convolutional Neural Network - A Deep Learning Approach”, *Procedia Computer Science*, **132** (2018), 679–688.
- [3] N.A. Babbysh, “Parametric synthesis of the interferential neural network”, *Bulletin of modern research*, **1** (2019), 13.
- [4] N.A. Babbysh, M.L. Ostanin, “Object recognition in high-resolution images using an interferential neural networks”, *Proceedings of the XI All-Russian Youth Scientific Technical Conference, BSTU “Voenmeh”*, 2019, 485.
- [5] N.A. Babbysh, “On the application of an interference neural network for dynamic data analysis in real time”, *Automation in Industry*, **4** (2020), 19–21.

- [6] NickWare Group LLC, “Interference C++ library. GitHub open repository.”, *GitHub*, 2019.

# Искусственный интеллект как инструмент для решения практических задач в нейробиологических исследованиях

Д. С. Бережной<sup>1</sup>, Т. К. Бергалиев<sup>2</sup>

Приведен обзор основных технических задач в рамках современной нейробиологии, которые могут быть успешно решены с применением технологий машинного обучения и искусственного интеллекта. Рассмотрены основные сложности при анализе временных рядов и сегментации изображений, с которыми сталкиваются исследователи, и способы их решения. Дан обзор современных технических решений с использованием сверточных нейросетей для решения практических задач в нейробиологических исследованиях.

**Ключевые слова:** нейросети, машинное обучение, обработка данных, анализ изображений, анализ временных рядов

## 1. Введение

Развитие технологий ИИ в последние годы во многом направляется областями их непосредственного применения. Так, интеллектуальный анализ больших данных является одним из основных направлений приложения искусственного интеллекта. Потребность в подобном анализе появилась в частности в связи с развитием цифрового бизнеса, увеличивающимися темпами накопления данных в цифровом виде и необходимостью их систематизации и интерпретации. Также благодаря актуальности стоявших прикладных задач активное развитие получили ряд направлений ИИ, в которых сейчас достигнуты особые успехи: обработка естественного языка, изображений, задачи кластеризации и классификации. Значительного развития достигли технологии нейросетевого анализа и классификации изображений, анализа и предсказания временных рядов.

При этом активное развитие ИИ-технологий наблюдается в прикладных областях — в области рекламы, развлечений, информационной без-

---

<sup>1</sup> *Бережной Даниил Сергеевич* — н.с. каф. высшей нервной деятельности Биологического ф-та МГУ; ст.н.с. ФГБНУ Научный центр неврологии, e-mail: berezhnoy.daniil@gmail.com.

Berezhnoy Daniil Sergeevich — researcher at Department of Higher Nervous Activity, Faculty of Biology, Lomonosov Moscow State University; senior researcher at Research Center of Neurology

<sup>2</sup> *Бергалиев Тимур Кайратович* — н.с. НИУ МФТИ; генеральный директор ООО BiTronics Lab, e-mail: timurbergaliyev@gmail.com.

Bergaliev Timur Kairatovich — reearcher at MIPT, head of BiTronics Lab Ltd.

опасности, финансов, автомобилестроения, потребительской техники. В то же время, складывается парадоксальная ситуация, когда в фундаментальных научных исследованиях, требующих достаточно сложных методов анализа данных, системы искусственного интеллекта до последнего времени не получали такого широкого распространения. В биологических науках это может быть связано с нехваткой математического базиса, недостаточной технической подготовкой исследователей, и, как следствие, относительно высоким “порогом входа” для освоения подобных технологий. И лишь в последние 5 лет эта ситуация постепенно начинает меняться в лучшую сторону — появляется все больше научных работ на стыке биологии и ИИ, прототипов и готовых решений для использования ИИ в биологических исследованиях [1]. В данной работе мы постараемся дать обзор подобных решений в нейробиологии и выделить направления их развития.

В рамках современных нейробиологических исследований возникает целый ряд технических задач, которые могут быть успешно решены с привлечением нейросетевых алгоритмов, получивших особое развитие в последние годы. В числе таких задач можно выделить анализ и классификацию временных рядов электрофизиологических данных (биосигналов) и выделение значимых объектов в зашумленных изображениях: как гистологических срезов мозга, так и видеоизображениях испытуемых в эксперименте.

## 2. Анализ биосигналов мозга

Исследования электрической активности головного мозга классически являются одним из основных направлений нейробиологии. При этом анализируемый сигнал в форме изменения потенциала во времени может представлять собой как активность отдельных клеток или их небольших популяций (LFP — local field potential), так и суммарную электрическую активность коры головного мозга (EEG — electroencephalogram). Если учитывать, что в современных исследованиях количество регистрируемых каналов часто превышает 100, а частота записи более 1 кГц, уже одна запись часового эксперимента ставит вопрос о поиске закономерности в больших данных. Задачей исследователя, в самом общем виде, является выделение определенных значимых событий или паттернов активности в этом сигнале, что может быть формализовано как анализ временных рядов (time-series analysis). Обычными методами здесь является исследование в частотной (например, спектральный анализ) или временной области (например, автокорреляция). Первыми из методов интеллектуального анализа данных, успешно применяемыми в области электрофизиологии, стали методы анализа компонент PCA и ICA, на-

пример, для выделения разрядов отдельных нервных клеток в суммарной записи с электрода [2]. Применяемые уже около 30 лет, благодаря появлению прикладных библиотек вроде scikit-learn для языка python и свободных программных решений эти методы в настоящее время доступны еще более широкому кругу исследователей. В то же время только в последние годы стали активно применяться методы полностью автоматической классификации фрагментов записи ЭЭГ на основе машинного обучения и нейросетевых алгоритмов [3]. Для классификации используются либо сами фрагменты записи — короткие “эпохи” по несколько секунд — либо производные их кепстрального анализа. В качестве методов для классификации в современных исследованиях используются самые различные варианты, которые приведены в подробном мета-анализе [4], но наибольшую эффективность показали сверточные нейросети. Нейросетевой подход с успехом был применен к задачам выделения сна и бодрствования, аффективных и когнитивных состояний, эпилепсии и других видов патологии. В то же время, большинство исследований задействуют открытые библиотеки python, поэтому создание удобного графического программного интерфейса для создания обучающей выборки биосигналов является необходимой задачей для дальнейшего распространения подобного подхода.

### **3. Подсчет клеток в гистологических исследованиях**

Задача обработки и анализа изображений в нейробиологии и, шире, в биологии, является одной из рутинных. В случае биомедицинских исследований анализ морфологического состава биологической ткани, измерения размера или количества определенных объектов по статичному изображению с микроскопа является достаточно простой, но регулярно повторяемой процедурой. Тем не менее, эта чисто техническая операция отнимает значительное количество времени при ручном выполнении, а в опросе 2009 года 71% исследователей отметили, что осуществляют подсчет клеток в гистологических препаратах вручную [5]. Отчасти это объясняется отсутствием удобных программных решений для автоматизированного выполнения подобной задачи, а отчасти — сложностью её осуществления с помощью стандартных методов анализа изображений. Основным инструментом анализа изображений в биологических исследованиях является программа ImageJ, которая является свободно доступной и для которой существует несколько плагинов подсчета клеток [6]. Большинство из них основано на стандартной процедуре выделения порога по одному из каналов (thresholding), что не всегда подходит для зашум-



ленных изображений или пересекающихся объектов сложной формы, к которым относятся и нервные клетки. Одним из перспективных подходов к решению этой проблемы является использование методов распознавания объектов с использованием нейросетей. В последние 5 лет появилось несколько готовых приложений для подсчета количества клеток [7, 8], основанных на предобученных сверточных нейросетях, среди которых наибольшую эффективность показывает архитектура U-Net. Новые разработки по этой теме включают также автоматическую сегментацию изображений с микроскопа и увеличение разрешения с помощью генеративных нейросетей [9].

## 4. Видео-трекинг и анализ поведения

Задача выделения объекта на изображении в нейробиологических исследованиях имеет и еще одно применение — анализ поведения животного по экспериментальным видеозаписям. Самым простым вариантом этой задачи является видеотрекинг — выделение траектории перемещения человека, животного или выбранной части тела в последовательности изображений. Учитывая сложность экспериментальной среды, возможных перемещений объекта и саму проблему отделения объекта от фона, вопрос применения систем компьютерного зрения здесь является крайне актуальным. В 2018 году для решения этой задачи была разработана система DeepLabCut, позволяющая с высокой точностью осуществить трекинг нескольких объектов по видео из эксперимента без предварительной обработки [10]. Успешность и скорость работы системы основаны на высокой эффективности переноса обучения (transfer learning) предобученных на открытой базе ImageNet нейросетей при их тренировке на новые объекты. Основным же плюсом системы, созданной с использованием открытых библиотек для языка python, является наличие графического интерфейса, показывающего пользователю все необходимые шаги от тренировки и оценки качества обучения нейросети до выделения объектов на тестовых видео. Таким образом, создана интуитивно-понятная система в виде приложения, которая может быть свободно использована любым исследователем без предварительного опыта с нейросетевым анализом изображений. Современные работы с применением данной системы показывают, что она уже вышла за рамки своей исходной прикладной задачи и позволяет решать уже чисто исследовательские вопросы автоматической сегментации и поиска паттернов поведения, незаметных при других способах анализа [11].

Этот пример показывает, что создание подобных интегрированных систем, решающих практические задачи и доступных для исследователей-биологов, не имеющих специальных знаний для примене-

ния ИИ, является необходимым шагом для дальнейшего развития междисциплинарного направления, связывающего исследования искусственного и естественного интеллекта.

## Список литературы

- [1] Hassoun S., Jefferson F., Shi X., et al, “Artificial Intelligence for Biology”, *Integrative and Comparative Biology*, 2021.
- [2] Chapin J.K., Nicolelis M. A. L., “Principal component analysis of neuronal ensemble activity reveals multidimensional somatosensory representations”, *Journal of Neuroscience Methods*, **94**:1 (1999), 121–140.
- [3] Gemein L., Schirrmeyer R., Chrabaszcz P., et al, “Machine-learning-based diagnostics of EEG pathology”, *NeuroImage*, **220** (2020), 117021.
- [4] Roy Y., Banville H., Albuquerque I., et al, “Deep learning-based electroencephalography analysis: a systematic review”, *Journal of Neural Engineering*, **16**:5 (2019), 051001.
- [5] Ongena K., Das C., Smith J., et al, “Determining Cell Number During Cell Culture using the Scepter Cell Counter”, *Journal of Visualized Experiments*, 2010, № 45.
- [6] Grishagin I., “Automatic cell counting with ImageJ”, *Analytical Biochemistry*, **473** (2015), 63–65.
- [7] Antonets, D., Russkikh, D., Sanchez, N., et al, “CellCountCV—A Web-Application for Accurate Cell Counting and Automated Batch Processing of Microscopic Images Using Fully Convolutional Neural Networks”, *Sensors*, **20**:13 (2020), 3653.
- [8] Falk T., Mai D., Bensch R., et al, “U-Net: deep learning for cell counting, detection, and morphometry”, *Nature Methods*, **16**:1 (2019), 67–70.
- [9] Ishii S., Lee S., Urakubo H., et al, “Generative and discriminative model-based approaches to microscopic image restoration and segmentation”, *Microscopy*, **69**:2 (2020), 79–91.
- [10] Mathis A., Mamidanna P., Cury K., et al, “DeepLabCut: markerless pose estimation of user-defined body parts with deep learning”, *Nature Neuroscience*, **21**:9 (2018), 1281–1289.
- [11] Shin J., Song M., Paik S., Jung M., “Spatial organization of functional clusters representing reward and movement information in the striatal direct and indirect pathways”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **117**:43 (2020), 27004–27015.

### Artificial intelligence as a research tool for solving technical tasks in neurobiology studies Berezhnoy D.S., Bergaliev T.K.

We give an overview of the main technical problems in the modern neurobiology studies, which can be successfully solved using machine learning and artificial intelligence technologies. The main difficulties encountered by researchers in the analysis of biosignals time series and image segmentation are considered. An overview of modern technical

solutions using convolutional neural networks for solving practical problems in neurobiological research is given.

**Keywords:** neural networks, machine learning, data processing, image processing, time-series analysis

## References

- [1] Hassoun S., Jefferson F., Shi X., et al, “Artificial Intelligence for Biology”, *Integrative and Comparative Biology*, 2021.
- [2] Chapin J.K., Nicolelis M.A.L., “Principal component analysis of neuronal ensemble activity reveals multidimensional somatosensory representations”, *Journal of Neuroscience Methods*, **94**:1 (1999), 121–140.
- [3] Gemein L., Schirrmeyer R., Chrabaszcz P., et al, “Machine-learning-based diagnostics of EEG pathology”, *NeuroImage*, **220** (2020), 117021.
- [4] Roy Y., Banville H., Albuquerque I., et al, “Deep learning-based electroencephalography analysis: a systematic review”, *Journal of Neural Engineering*, **16**:5 (2019), 051001.
- [5] Ongena K., Das C., Smith J., et al, “Determining Cell Number During Cell Culture using the Scepter Cell Counter”, *Journal of Visualized Experiments*, 2010, № 45.
- [6] Grishagin I., “Automatic cell counting with ImageJ”, *Analytical Biochemistry*, **473** (2015), 63–65.
- [7] Antonets, D., Russkikh, D., Sanchez, N., et al, “CellCountCV—A Web-Application for Accurate Cell Counting and Automated Batch Processing of Microscopic Images Using Fully Convolutional Neural Networks”, *Sensors*, **20**:13 (2020), 3653.
- [8] Falk T., Mai D., Bensch R., et al, “U-Net: deep learning for cell counting, detection, and morphometry”, *Nature Methods*, **16**:1 (2019), 67–70.
- [9] Ishii S., Lee S., Urakubo H., et al, “Generative and discriminative model-based approaches to microscopic image restoration and segmentation”, *Microscopy*, **69**:2 (2020), 79–91.
- [10] Mathis A., Mamidanna P., Cury K., et al, “DeepLabCut: markerless pose estimation of user-defined body parts with deep learning”, *Nature Neuroscience*, **21**:9 (2018), 1281–1289.
- [11] Shin J., Song M., Paik S., Jung M., “Spatial organization of functional clusters representing reward and movement information in the striatal direct and indirect pathways”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **117**:43 (2020), 27004–27015.

# Аппаратное обеспечение для нейросетей

Д. А. Иванов<sup>1</sup>

Современный успех в области нейронных сетей во многом обусловлен наличием достаточного количества аппаратных ресурсов. В работе проведен анализ основных современных аппаратных решений для ИИ (CPU, GPU, TPU), рассмотрены их преимущества и недостатки.

**Ключевые слова:** графический процессор, тензорный процессор, аппаратное обеспечение, нейронные сети

## 1. Введение

Большие наборы данных и достаточные аппаратные ресурсы определили со-временный успех в области нейронных сетей. Именно отсутствие двух данных вещей не позволило появившимся в конце 80-х/начале 90-х годов архитектурам нейронных сетей завоевать популярность. Как хорошо показано в работе [3] именно наличие подходящего железа выводит определенную технологию на передний план, а не только качество самой технологии/идеи.

На сегодняшний день появляется огромное количество специализированных аппаратных решений для ИИ. Во многом это обуславливается ослаблением работы закона Мура и прекращение работы закона Деннарда, что в итоге лишает возможности опираться на постоянный рост вычислительных мощностей и дает большое поле для появления специализированных архитектур [2].

Данные DSP (Domain Specific Processors) решения могут быть сосредоточены как на решении только задачи inference сети, так и на задачах обучения, также они могут быть специально адаптированы под определенные типы нейросетей или нацелены на решения проблема энергоэффективности. Далее мы сосредоточимся на трех архитектурах (CPU, GPU, TPU), которые могут быть использованы как для inference так и для обучения. Первые две являются повсеместно распространенными и являются основными вычислителями для работы с нейросетями.

---

<sup>1</sup>Иванов Дмитрий Александрович — аспирант кафедры суперкомпьютеров и квантовой информатики ф-та ВМК МГУ; эксперт группы нейроморфных вычислений, ЧУ Цифрум, Росатом, e-mail: rudimiv@gmail.com

Ivanov Dmitry Alexandrovich — graduate student, Lomonosov Moscow State University, Faculty of CMC, Chair of Supercomputers and Quantum Informatics; Expert of the Neuromorphic Computing Group, PI Cifrum, Rosatom.

## 2. Нейронные сети с точки зрения архитектуры фон Неймана

Одним из принципов архитектуры фон Неймана является разделение памяти и вычислений. И если данный подход себя оправдывал на заре компьютерной эры, то на сегодняшний день он привел к такому явлению как фон Неймановское бутылочное горлышко. В самом деле если посомтреть на энергозатраты и скорость доступа к памяти в регистрах/кэшах/RAM, то можно увидеть различия на порядки (см рис. 1).

При этом основной операцией в нейронных сетях является операция перемножения матрицы на вектор.  $y = Wx$ ,  $o = f(y)$ . Для проведения данной операции требуется вначале получить данные из памяти, а именно  $n^2$  весов  $W$  и  $n$  значений вектора  $x$ . Причем,  $n^2$  весов будет использоваться единожды за эту операцию, в то время как значения из вектора  $x$  будут переиспользоваться. Ситуация отчасти облегчается, если используются батчи, что однако не всегда возможно. Также ситуация может быть чуть проще, если происходит работа со сверточными операциями, в которых веса регулярно переиспользуются при расчете новой свертки.

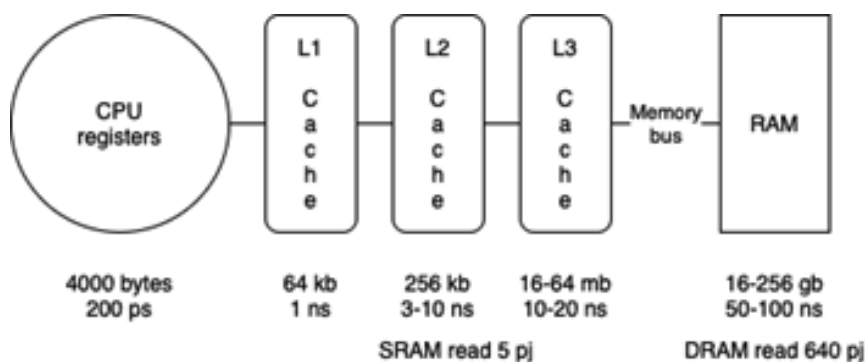


Рис. 1. Иерархия памяти.

## 3. CPU

Классически, проблема в скоростях доступа к памяти решалась в CPU с помощью сложной многоуровневой системы кешей. Так в современных процессорах размер кешей может составлять 40 процентов площади чипа, обеспечивая десятки мегабайт сверхбыстрой памяти. Однако размер нейронных сетей и особенности их вычислений не позволяет уместить все веса в кэши.

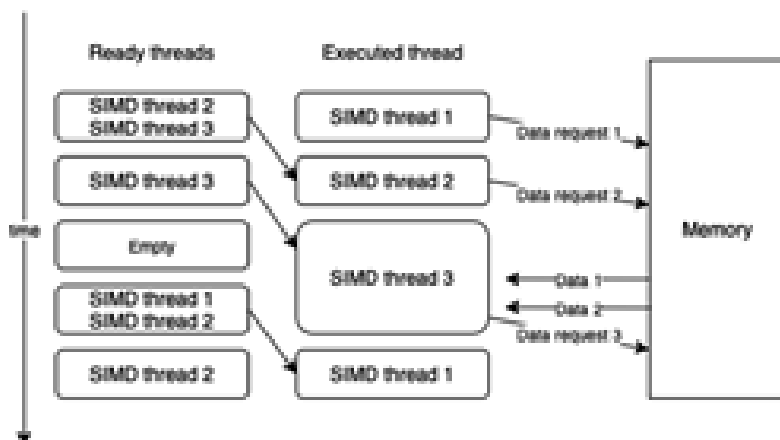


Рис. 2. Переключение между потоками в GPU

Другим традиционным подходом оптимизации процессоров были спекулятивные вычисления, предсказание ветвлений и тд. Однако перемножение матриц является процессом в котором порядок вычислений заранее известен и не требует таких сложных подходов к вычислениям, что делает данные механизмы бесполезными.

Таким образом CPU может подходить только для вычисления маленьких нейронных сетей, но никак не современных больших архитектуру размером в сотни мегабайт.

## 4. GPU

В GPU используется несколько стратегий для борьбы с задержками памяти. Основная из них заключается в том, что на каждом вычислительном ядре (Streaming Multiprocessor) имеется большой file register который позволяет сохранять контекст выполнения для многих потоков и быстро между ними переключаться (см. рис. 2). Планировщик вычислений использует данную возможность и когда в каком-то из потоков инструкций (варпов) (SIMD thread 1) исполняется команда с большим latency, к примеру получение данных из памяти, то сразу же происходит переключение на другой поток инструкций (SIMD thread 2), при наступлении и в нем медленной команды, начинается выполнение нового готового потока инструкций (SIMD thread 3). Через какое-то время приходят данные для первого потока и он тоже становится готовым к исполнению. Таким образом происходит сокрытие latency памяти [1] (см. рис. 2). Причем таких Streaming Multiprocessorces в GPU могут быть десятки и даже больше сотни, которые делят между собой нагрузку.

Однако помимо latency важна также пропускная способность памяти, то есть количество данных, которое мы можем в пределе получить из памяти. Именно для оптимизации данной проблемы в видеокартах начиная с P100 (2016) Nvidia начала добавлять HBM (High Bandwidth Memory) память, что резко увеличило их производительность по сравнению с предыдущими поколениями. В архитектурах Volta и Turing Nvidia продолжала наращивать пропускную способность памяти, доведя в архитектуре A100 ее до 1.5 тб/с.

## 5. TPU

Первая версия процессора на данной архитектуре была анонсирована компанией Google в 2016 году и носит название TPUv1 [4]. Основным способом борьбы с задержками и низкой пропускной способностью памяти является использование вместо кэшей так называемых систолических матриц и программно управляемой памяти.

Идея систолических вычислений заключается в создании большой матрицы (для tpuv1 —  $256 \times 256$ ) вычислительных блоков, каждый из которых хранит внутри себя вес и выполняет следующие две операции: число  $x$ , которое пришло к нему от блока сверху, он умножает на вес и прибавляет полученное значение к числу, которое пришло к нему слева. Затем он отправляет число  $x$ , полученное сверху, своему соседу снизу, а полученную сумму отправляет соседу справа. Таким образом TPU выполняет перемножения матриц в конвейере. При достаточно большом размере батча ему не придется постоянно обращаться за весами в память, так как веса находятся в самих вычислительных блоках. При этом, при большом размере батча (больше ширины систолического массива), TPU сможет каждый такт выдавать по одному результату перемножения матрицы  $256 \times 256$  на вектор длины 256.

## 6. Заключение

Как мы видим одной из основных вычислительных проблем для систем ИИ является проблема доступа к памяти, с которой все предложенные варианты архитектур борются с той или иной степенью успешности. Именно бутылочное горлышко фон Неймана дает нам проблемы задержек доступа к памяти (latency), пропускной способности памяти (bandwidth) и энергопотребления. Развитие вычислительных мощностей для ИИ будет во многом определяться именно решением данной проблемы.

## Список литературы

- [1] Patterson D. A., Hennessy J. L., *Computer Organization and Design: The Hardware/Software Interface, ARM Edition*, Morgan Kaufmann, 2016, 720 pp.
- [2] Hennessy J. L., Patterson D. A., “A New Golden Age for Computer Architecture”, *Communications of the ACM*, **62**:2 (2019), 48–60
- [3] Hooker S., *The hardware lottery*, 2020, arXiv:2009.06489.
- [4] Jouppi N. P. et al., “A domain-specific architecture for deep neural networks”, *Communications of the ACM*, **61**:9 (2018), 50–51.

### Hardware for neural networks

Ivanov D.A.

The current success in the field of neural networks is largely due to the availability of a sufficient amount of hardware resources. The paper analyzes the main modern hardware solutions for AI (CPU, GPU, TPU), considers their advantages and disadvantages.

*Keywords:* GPU, TPU, hardware, neural networks

## References

- [1] Patterson D. A., Hennessy J. L., *Computer Organization and Design: The Hardware/Software Interface, ARM Edition*, Morgan Kaufmann, 2016, 720 pp.
- [2] Hennessy J. L., Patterson D. A., “A New Golden Age for Computer Architecture”, *Communications of the ACM*, **62**:2 (2019), 48–60
- [3] Hooker S., *The hardware lottery*, 2020, arXiv:2009.06489.
- [4] Jouppi N. P. et al., “A domain-specific architecture for deep neural networks”, *Communications of the ACM*, **61**:9 (2018), 50–51.



# Диагностика нефтяных трубопроводов с помощью машинного обучения

Ю. Д. Кацер<sup>1</sup>, В. О. Козицин<sup>2</sup>

Метод дефектоскопии на основе магнитного потока является наиболее распространенным подходом для неразрушающего контроля нефте- и газопроводов. В результате дефектоскопии получают магнитограммы, зачастую анализируемые полуавтоматизированными методами, что приводит к снижению точности и увеличению времени анализа.

В работе предложена новая архитектура CNN для автоматической классификации изображений на основе магнитограмм для диагностики нефтепроводов. В результате апробации разработанных алгоритмов на отложенной выборке была доказана высокая точность и эффективность разработанного решения.

**Ключевые слова:** Глубинное обучение, Машинное зрение, сверточные нейронные сети, поиск аномалий, внутритрубная диагностика нефтепроводов, обработка данных магнитного потока

## 1. Введение

Метод дефектоскопии на основе магнитного потока (Magnetic Flux Leakage - MFL) является наиболее распространенным подходом для неразрушающего контроля нефте- и газопроводов. Данные, полученные в процессе дефектоскопии трубопровода, в основном анализируются традиционными методами Машинного Обучения (МО). Основная задача обработки данных с дефектоскопа это классифицировать стенку трубопровода на дефектную и бездефектную. Сравнение качества работы различных методов МО для проблемы обнаружения дефектов представлено в [1]. Основная проблема этого подхода заключается в необходимости создания информативных и важных признаков на основе данных магнитограмм, которые будут использоваться в качестве входных данных для методов МО. Обычно эти диагностические признаки генерируются использованием экспертных знаний и представляют собой созданные вручную эвристики. Это накладывает ограничение на качество решения

---

<sup>1</sup>Кацер Юрий Дмитриевич — аспирант сколковского института науки и технологий, e-mail: Iurii.katser@skoltech.ru.

Katser Iurii Dmitrievich — graduate student, Skolkovo Institute of Science and Technology.

<sup>2</sup>Козицин Вячеслав Олегович — аспирант сколковского института науки и технологий, e-mail: Vyacheslav.Kozitsin@skoltech.ru.

Kozitsin Vyacheslav Olegovich — graduate student, Skolkovo Institute of Science and Technology.

задачи обнаружения дефектов. Разнообразие наиболее успешных диагностических признаков представлено и подробно проанализировано в работе [2].

Глубокое обучение показало значительный прогресс и достигло невероятных результатов во многих приложениях, только за последние несколько лет. Задача классификации изображений является одним из наиболее успешных примеров применения глубокого обучения и, в частности, свёрточных нейронных сетей (CNN). Их преимуществом является возможность решать проблемы обнаружения, классификации и сегментации дефектов или сварных швов трубопроводов одновременно с автоматизированным созданием диагностических признаков. Таким образом, в данной работе исследовалось применение глубокого обучения для задач диагностики трубопроводов. В CNN используются три основных типа слоев: convolutional (сверточный), pooling и fully-connected layer (полносвязный линейный) слой. Сверточные слои предназначены для извлечения признаков из входных данных путем применения фильтров к различным областям изображений. После нескольких сверточных слоев, обычно применяются pooling слои, чтобы уменьшить размер получившегося тензора. Полносвязные слои - это, как правило, последние слои CNN, обладающие схожей структурой по сравнению с традиционными нейронными сетями прямого распространения.

## 2. Архитектура разработанной CNN

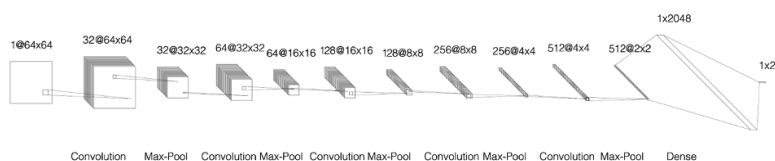


Рис. 1. Архитектура разработанной CNN

Предлагаемая архитектура (рис. 1) состоит из 5 сверточных слоев. За каждым сверточным слоем следуют BatchNormalization и Dropout слои последовательно (не показано на рисунке). Все сверточные слои имеют одинаковый размер ядра - 5 x 5. Все слои MaxPooling имеют одинаковый размер ядра - 2 x 2 с шагом - 2.

## 3. Данные

Данные собраны при обследовании трубы диаметром 219 мм. Выборка данных магнитного потока предоставляет информацию об одном запус-

ке дефектоскопа. Выборка данных имеет 64 признака, собранных в виде вектора для каждого шага движения дефектоскопа внутри трубы. Выборка данных содержит 4470704 точки, представляющих участок трубопровода длиной 15162,85 метра. Значения выборки варьируются от 0 до 4095 единиц. В выборке зафиксировано наличие 745 дефектов разных типов и 1462 сварных шва, 34 из которых дефектные. Прилагаемый к выборке данных технический отчет содержит информацию о местоположении сварных швов и дефектов, типах дефектов, размерах и других соответствующих характеристиках.

Таблица 1. Характеристики используемых данных

Параметр	Значение
Диаметр трубопровода, мм	219
Длина трубопровода, м	15162,85
Количество точек	4470704
Количество признаков	64
Минимальное значение в выборке	0
Максимальное значение в выборке	4095
Количество дефектов	745
Количество швов (с дефектом)	1462 (34)

## 4. Результаты

В конечном итоге, в данной работе предложена новая архитектура CNN для классификации изображений на основе магнитограмм. Кроме того, представлены существующие архитектуры, которые достигают лучших результатов на сегодняшний день в задачах классификации данных магнитограмм и рентгеновского излучения при анализе трубопроводов. В результате апробации разработанных алгоритмов на отложенной выборке была доказана эффективность разработанного решения:

- точность обнаружения дефектов – более 90%;
- точность многоклассовой классификации – 95% .

Результаты экспериментов доказывают, что все части процесса диагностики нефтепровода могут быть полностью автоматизированы с высоким качеством.

## Список литературы

- [1] Khodayari-Rostamabad A., Reilly J., Nikolova N., Hare J., Pasha S., “Machine learning techniques for the analysis of magnetic flux leakage images in pipeline inspection”, *IEEE Transactions on Magnetics*, **45:8** (2009), 3073–3084.
- [2] Д. А. Слесарев, *Развитие магнитного метода неразрушающего контроля за счет автоматизации обработки данных и оптимизации алгоритмов обнаружения дефектов*, дисс. . . . докт. техн. наук, Москва, 2017, 43 pp.

### **Machine Learning Based Oil Pipeline Diagnostics Katser I.D., Kozitsin V.O.**

The magnetic flux leakage (MFL) method is the most common approach for non-destructive testing of oil and gas pipelines. As a result of MFL detection, magnetograms are obtained, often analyzed by semi-automated methods, which leads to a decrease in accuracy and an increase in analysis time.

The paper proposes a new CNN architecture for automatic image classification based on magnetograms for oil pipeline diagnostics. As a result of testing the developed algorithms on a deferred sample, the high accuracy and efficiency of the developed solution were proved.

*Keywords:* Deep learning, Computer vision, Convolutional neural networks, Anomaly detection, Oil pipeline diagnostics, Magnetic Flux Leakage data processing

## References

- [1] Khodayari-Rostamabad A., Reilly J., Nikolova N., Hare J., Pasha S., “Machine learning techniques for the analysis of magnetic flux leakage images in pipeline inspection”, *IEEE Transactions on Magnetics*, **45:8** (2009), 3073–3084
- [2] Slesarev D.A, *Development of the magnetic method of non-destructive testing due to automation of data processing and optimization of defect detection algorithms*, Doctor of Science in Technology, Moscow, 2017 (In Russian), 43 pp.

# Интегральная система для обработки биосигналов на основе алгоритмов ИИ и перспективы ее применения

Ю. С. Ковалев<sup>1</sup>, Д. С. Бережной<sup>2</sup>, С. В. Сахно<sup>3</sup>, Т. К. Бергалиев<sup>4</sup>,  
М. А. Киселева<sup>5</sup>

Рассматриваются возможности применения системы программного обеспечения и протоколов обмена данными, обеспечивающей взаимодействие систем сбора данных, (в частности биосенсоров), систем обработки данных на основе алгоритмов искусственного интеллекта и пользователя. Система предназначена для снижения “порога вхождения” в область обработки и распознавания данных на основе ИИ. Прототип системы успешно испытан на задаче распознавания жестов с использованием малого количества датчиков ЭМГ.

**Ключевые слова:** протокол, обучение с подкреплением, обработка данных, ЭМГ

## 1. Введение

Несмотря на широкое распространение в последнее время технологий интеллектуальной обработки данных, языков программирования, порог

---

<sup>1</sup>Ковалев Юрий Сергеевич — к.ф.-м.н., старший научный сотрудник Объединенного института ядерных исследований, ведущий программист ООО BiTronics Lab, email: yurisk@phystech.edu

Kovalev Yury Sergeevich — Ph.D., senior researcher of Joint Institute for Nuclear Research, lead engineer of BiTronics Lab

<sup>2</sup>Бережной Даниил Сергеевич — н.с. каф. высшей нервной деятельности Биологического ф-та МГУ; ст.н.с. ФГБНУ Научный центр неврологии, e-mail: berezhnoy.daniil@gmail.com.

Berezhnoy Daniil Sergeevich — researcher at Department of Higher Nervous Activity, Faculty of Biology, Lomonosov Moscow State University; senior researcher at Research Center of Neurology

<sup>3</sup>Сахно Сергей Владимирович — к.ф.-м.н., научный сотрудник Московского физико-технического института (НИУ), технический директор ООО BiTronics Lab тел.: +79167701865, email: s2001@list.ru

Sakhno Sergey Vladimirovich — Ph.D., researcher at MIPT, technical director of ООО BiTronics Lab

<sup>4</sup>Бергалиев Тимур Кайратович — н.с. НИУ МФТИ; генеральный директор ООО BiTronics Lab, e-mail: timurbergaliyev@gmail.com.

Bergaliev Timur Kairatovich — researcher at MIPT, head of BiTronics Lab

<sup>5</sup>Киселева Мария Александровна — инженер-исследователь ООО BiTronics Lab, email: m.kiseleva.173@gmail.com

Kiseleva Maria Alexandrovna — engineer-researcher BiTronics Lab Lab

вхождения в которые сравнительно невысок, и прикладных библиотек, спроектированных для легкого подключения и настройки различных алгоритмов ИИ, количество инженеров и исследователей, не имеющих специальных знаний для применения ИИ, но нуждающихся в нём, достаточно велик. В частности, достаточно велик запрос на применение технологий ИИ в физиологии и медицине - в задачах работы с биосигналами [1]-[2]. В эту область, например, попадают различные средства нейро-реабилитации, конструирование робототехнической и медицинской техники, средства расширения возможностей человека и протезирования, носимая электроника, средства мониторинга состояния человека и научные исследования в областях, более связанных с прикладными аспектами функционирования живых организмов, нежели с математическими методами обработки данных.

Соответственно, необходим инструмент, предоставляющий возможности для использования алгоритмов ИИ в научно-инженерных задачах, а также позволяющий понизить порог вхождения в эту область и начать изучение ИИ со стороны прикладных задач с возможностью последующего углубления научно-теоретического базиса.

## 2. Дизайн системы

Была разработана интегральная система, состоящая из протоколов взаимодействия с системами сбора данных от биосенсоров, исполнительными устройствами и вычислительным сервером, а также программы-интерфейса (Рис.1). Ключевым элементом системы, обеспечивающей ее доступность для неподготовленного пользователя, является программа-интерфейс, обеспечивающая визуальный доступ к данным и вычислительным функциям, а также в интуитивно-понятной форме отображающая нужную последовательность действий при обработке данных.

Программа-интерфейс объединяет подключенные устройства, пользователя и вычислительный сервер, а именно:

- осуществляет взаимодействие с системами сбора данных и вычислительным сервером
- представляет данные биосенсоров в доступном пользователю виде,
- предоставляет некоторые возможности анализа и предобработки данных,
- предоставляет интерфейс для выбора настроек алгоритмов ИИ и создания обучающих выборок

- осуществляет в реальном времени сбор данных от сенсоров, передачу их для обработки (распознавания) на вычислительный сервер, прием от сервера результатов обработки и передачу её исполнительным устройствам в виде команд.

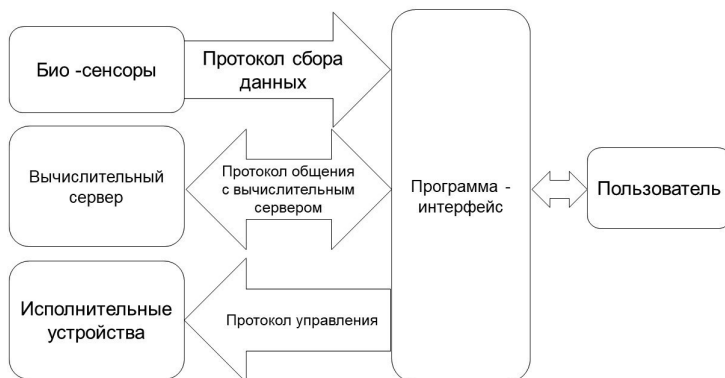


Рис. 1. Архитектура предлагаемой системы

Пользовательский интерфейс программы автоматически модифицируется в зависимости от получаемой согласно протоколам информации о подключенных датчиках, наличии и настроек исполнительных устройств, настроек алгоритмов ИИ.

Таким образом конечному пользователю для объединения биосенсоров и ИИ в одном проекте достаточно иметь общее понимание параметров настройки алгоритмов ИИ, а в наиболее простом случае - только лишь иметь биосенсоры и вычислительный сервер, способные обмениваться данными согласно установленному протоколу. В то же время любой из основных компонентов системы может быть заменен другим, поддерживающим соответствующие протоколы, в т.ч. и программа-интерфейс.

### 3. Практическая часть

Был испытан прототип системы для задачи распознавания жестов оператора с использованием малого количества (1-4) электромиографических (ЭМГ) сенсоров. Прототип состоял из устройства сбора данных, интерфейса пользователя, позволяющего собирать обучающие выборки и настраивать параметры ИИ, отдельного вычислительного ядра, исполнительного устройства. Для практической проверки концепции была выбрана задача распознавания жестов на основе показаний датчиков ЭМГ,

вследствие её наглядности и применимости в ряде смежных областей, а именно: реабилитации, управлении внешними устройствами (в частности - протезами), распознавании речи, ЭМГ - артефактов в сигналах ЭЭГ и т.п [3].

В качестве источника данных использовались два одноканальных аналоговых сенсора компании ViTronics Lab, подключенные через виртуальный USB COM-порт. Вычислительный сервер представлял из себя отдельную программу, подключенную по протоколу TCP/IP, а взаимодействие с пользователем осуществлялось через программу-интерфейс, позволяющую в графическом виде набирать из сигнала ЭМГ обучающую выборку. В качестве исполнительного устройства использовалось программно эмулируемое устройство.

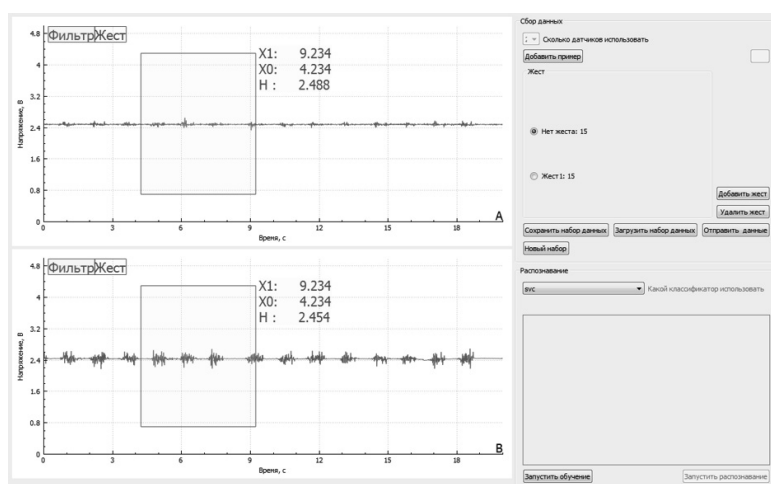


Рис. 2. Интерфейс программы при использовании двух сенсоров ЭМГ

Самая простая и широко применяемая схема управления с помощью ЭМГ основана на триггерном принципе, когда каждый сенсор по превышению пороговой величины сигнала может определить напряжена мышца или нет, что для двух датчиков позволяет сформировать до четырех управляющих команд [4]. Во многих случаях этого недостаточно, поэтому в нашем случае к данным были применены алгоритмы распознавания жестов на основе метода опорных векторов (SVM) и нейронных сетей (НС), которые позволили увеличить практическую эффективность системы [5]-[6]. В ходе тестирования системы пользователями с минимальной специальной подготовкой при использовании всего двух сенсоров ЭМГ была достигнута вероятность распознавания семи жестов с точностью более 80% и удалось управлять подключенным виртуальным



устройством с помощью жестов руки.

Испытания системы показали, что предложенная архитектура дает возможность практически использовать алгоритмы ИИ людям без глубокого опыта в данной области и позволяет сосредоточиться на достижении практического результата. Использование предложенной архитектуры может быть распространена на более широкий класс задач:

- 1) образовательных программ по ИИ для неспециалистов
  - а) курсы по обработке биосигналов для студентов-биологов
  - б) анализ временных рядов для студентов-физиков
- 2) медицинских технологий
  - а) создании персонализированных систем тренировки пациентов при реабилитации, в т.ч. нейрореабилитации
  - б) создания диагностических инструментов (поиск характерных признаков заболеваний в биоданных, в т.ч. - биосигналах)
- 3) технических систем
  - а) быстрого прототипирования и создания алгоритмов для человеко-машинных интерфейсов, в частности протезирования
  - б) создание и обучение интерфейсов безмолвного доступа на основе ЭМГ
  - в) ускорение тестирования математических методов и алгоритмов в прикладных задачах обработки временных рядов

## Список литературы

- [1] Y. Roy, H. Banville, I. Albuquerque, A. Gramfort, T.H. Falk and J. Faubert, “Deep learning-base electroencephalography analysis: a systematic review”, *Journal of neural engineering*, **16**:5 (2019).
- [2] M. Schwaibold, T. Penzel, J. Schochlin and A. Bolz, “Combination of AI components for biosignal processing application to sleep stage recognition.”, 2001 Conference Proceedings of the 23rd Annual International, Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, **2** (2001), 1692-1694.
- [3] C.Fang, B.He, Y.Wang, J.Cao, S.Gao, “EMG-Centered Multisensory Based Technologies for Pattern Recognition in Rehabilitation: State of the Art and Challenges”, 2001 Conference Proceedings of the 23rd

Annual International, Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, *Biosensors 2020*, **10(8)** (2001), 85.

- [4] A.Fleming, N.Stafford, S.Huang, X.Hu, D.P.Ferris, H.Huang, “Myoelectric control of robotic lower limb prostheses: a review of electromyography interfaces, control paradigms, challenges and future directions”, *Journal of Neural Engineering*, **18(4)** (2021).
- [5] S. Halder, M. Bensch, J. Mellinger, M. Bogdan, A. Kubler, N. Birbaumer, and W. Rosenstiel, “Online artifact removal for brain-computer interfaces using support vector machines and blind source separation”, *Computational Intelligence and Neuroscience, Biosensors 2020*, 2007.
- [6] B. Karlik, “Differentiating type of muscle movement via ar modeling and neural network classification.”, 2001 Conference Proceedings of the 23rd Annual International, Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, *Turk J Elec Engin*, **7(1-3)** (1999).

**The development of an integral system for the AI-based biosignal data processing and further perspectives of its use**  
**Kovalev Yu.S., Berezchnoy D.S., Sakhno S.V., Bergaliev T.K., Kiseleva M.A.**

The purpose of this study is to examine the utility of using a software system and data exchange protocols that support interaction of data collection systems (in particular biosensors), data processing systems based on AI and user algorithms. The system is designed to reduce the “entry barrier” into the field of data processing based on AI. The prototype of the system has been successfully tested by means of an example of a problem of gesture recognition using a small number of EMG sensors.

*Keywords:* protocols, electromyography, machine learning, data processing

## References

- [1] Y. Roy, H. Banville, I. Albuquerque, A. Gramfort, T.H. Falk and J. Faubert, “Deep learning-base electroencephalography analysis: a systematic review”, *Journal of neural engineering*, **16:5** (2019).
- [2] M. Schwaibold, T. Penzel, J. Schochlin and A. Bolz, “Combination of AI components for biosignal processing application to sleep stage recognition.”, 2001 Conference Proceedings of the 23rd Annual

- International, Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, **2** (2001), 1692-1694.
- [3] C.Fang, B.He, Y.Wang, J.Cao, S.Gao, “EMG-Centered Multisensory Based Technologies for Pattern Recognition in Rehabilitation: State of the Art and Challenges”, 2001 Conference Proceedings of the 23rd Annual International, Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, *Biosensors 2020*, **10(8)** (2001), 85.
- [4] A.Fleming, N.Stafford, S.Huang, X.Hu, D.P.Ferris, H.Huang, “Myoelectric control of robotic lower limb prostheses: a review of electromyography interfaces, control paradigms, challenges and future directions”, *Journal of Neural Engineering*, **18(4)** (2021).
- [5] S. Halder, M. Bensch, J. Mellinger, M. Bogdan, A. Kubler, N. Birbaumer, and W. Rosenstiel, “Online artifact removal for brain-computer interfaces using support vector machines and blind source separation”, Computational Intelligence and Neuroscience, *Biosensors 2020*, 2007.
- [6] B. Karlik, “Differentiating type of muscle movement via ar modeling and neural network classification.”, 2001 Conference Proceedings of the 23rd Annual International, Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, *Turk J Elec Engin*, **7(1-3)** (1999).

# Фреймворк с открытым исходным кодом для обнаружения аномалий и прогнозирования состояния в технических системах

В. О. Козицин<sup>1</sup>, Ю. Д. Кацер<sup>2</sup>

Современные технические системы, такие как атомные электростанции, оснащены диагностическими системами. Но эти системы и по сей день несовершенны, и инциденты с отказами иногда случаются. Несчастные случаи могут привести не только к экономическим потерям, но и к пугающим социальным последствиям, таким как антропогенные катастрофы. Другой типичной проблемой для АЭС является чрезмерное дублирование систем безопасности, что увеличивает стоимость самой АЭС. Решением может стать продвинутая диагностическая система. В диагностике, как науке, можно выделить три основных этапа: первый — это мониторинг технического состояния; второй — поиск первопричины аномалий; третий — это прогноз будущего состояния технической системы. Разработанный фреймворк может быть использован для решения всех этих диагностических задач.

**Ключевые слова:** диагностика технических систем, машинное обучение, глубинное обучение, анализ временных рядов, поиск аномалий, прогнозирование временных рядов, предварительная обработка данных, фреймворк

## 1. Введение

Разрабатываемый фреймворк называется TSAD (Time Series Analysis for Diagnostics) и реализован как библиотека (Package) на языке программирования Python3. Использует внутри себя библиотеки только с открытым исходным кодом и сам является таковым. Документация библиотеки опубликована на [readdocs.io](https://readdocs.io) а сама библиотека на ресурсах PyPi и GitHub.

---

<sup>1</sup> *Козицин Вячеслав Олегович* — аспирант Сколковского института науки и технологий, e-mail: [Vyacheslav.Kozitsin@skoltech.ru](mailto:Vyacheslav.Kozitsin@skoltech.ru).

*Kozitsin Vyacheslav Olegovich* — post-graduate student, Skolkovo Institute of Science and Technology

<sup>2</sup> *Кацер Юрий Дмитриевич* — аспирант Сколковского института науки и технологий, e-mail: [Iurii.katser@skoltech.ru](mailto:Iurii.katser@skoltech.ru).

*Katser Iuriy Dmitrievich* — post-graduate student, Skolkovo Institute of Science and Technology

Фреймворк задумывался как инструмент, упрощающий применение машинного обучения для задач диагностики технических систем. Связь некоторых задач диагностики [1] и математической постановки задачи в фреймворке, приведена в таблице 1. Также фреймворк может быть задействован при решении следующих задач:

- предварительная обработка данных:
  - заполнение пропусков;
  - обработка неравномерно-распределённых во времени многомерных временных рядов до удовлетворения требованиям к данным на вход нейронным сетям;
  - разделение на тренировочную и тестовую выборку временных рядов;
  - загрузчики для обучения нейронных сетей;
  - другие функции;
- другие применения в промышленности:
  - виртуальный датчик;
  - прогнозирование качества продукции;
  - рекомендательная система по улучшения технологического процесса;
- прогнозирование временных рядов в широком смысле (не только применительно к диагностике технических систем);
- обнаружение аномалий в широком смысле (не только применительно к диагностике технических систем);
- оценка алгоритмов обнаружения аномалий.

Реализуемый функционал TSAD показан на рис. 1.

Этапы жизненного цикла в соответствии с методологией CRISP-DM [2], которые на данный момент, по мнению авторов, упрощаются с помощью TSAD представлены на рис. 2.

## 2. Алгоритм обнаружения аномалий

Этапы основного алгоритма обнаружения аномалий [3] в TSAD: прогноз временного ряда на один шаг вперед; вычисление ошибки между прогнозным и реальным значением временного ряда; применение анализа

Задача технической диагностики	Задача, которая может быть решена с помощью фреймворка.
Обнаружение отклонения в поведении машины	Задача обнаружений аномалий в многомерных и одномерных временных рядах.
Выявление неисправностей и их причин	<p>Определение сигналов, внесших наибольший вклад в обнаружение аномалии.</p> <p>В случае большого количества неисправностей, задача классификации временных рядов (на неисправности).</p>
Прогнозирование развития неисправностей	<p>Прогноз многомерных и одномерных временных рядов, например, критически важных сигналов, на определенный горизонт прогнозирования.</p> <p>Прогнозирование остаточного ресурса оборудования или системы, например, в часах или сутках.</p> <p>Прогнозирование показателей до пересечения с пороговыми значениями.</p>

Таблица 1. Связь задачи диагностики и поставленной задачи в фреймворке.

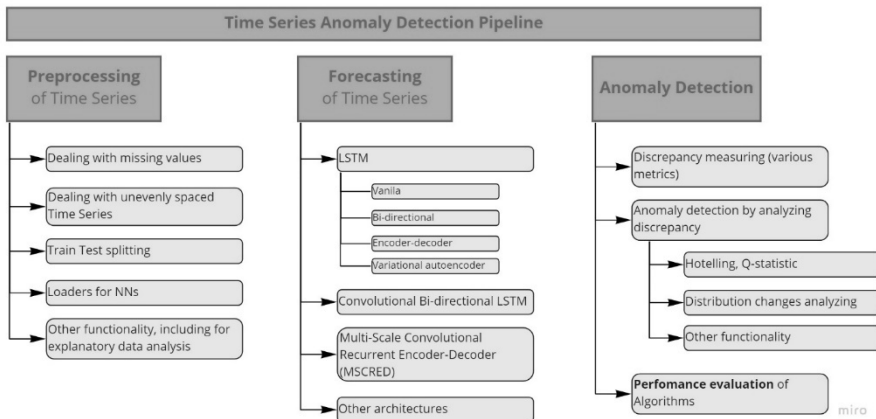


Рис. 1. Функциональность TSAD

остатков для поиска аномалий. В фреймворке по умолчанию в качестве алгоритма анализа остатков реализована статистика Хотеллинга:

$$T_i^2 = (X_i - \mu) S^{-1} (X_i - \mu)^T ,$$

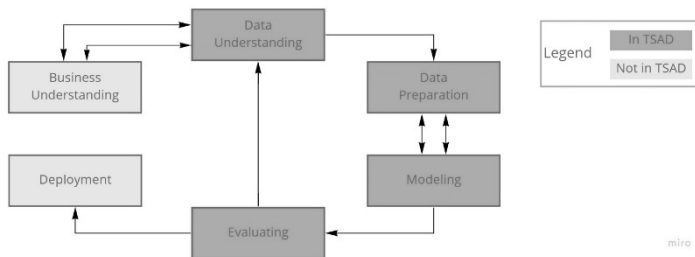


Рис. 2. Место TSAD в методологии CRISP-DM

где индекс  $i$  обозначает текущее состояние,  $X_i$  — вектор текущего состояния,  $\mu$  — вектор средних значений временного ряда, полученного на обучающей выборке,  $S$  ковариационная матрица, полученная на обучающей выборке. Для данной статистики назначается верхний контрольный предел, который в TSAD по умолчанию эвристически назначен 5 стандартным отклонениям статистики Хотеллинга на обучающей выборке.

## Список литературы

- [1] ГОСТ ИСО 13381-1-2016. Национальный стандарт Российской Федерации. Контроль состояния и диагностика машин. Прогнозирование технического состояния. Часть 1. Общее руководство., М.: Стандартинформ, 2019, 24 с.
- [2] Chapman P., et al., *CRISP-DM 1.0: Step-by-step data mining guide*, 2000, <https://www.the-modeling-agency.com/crisp-dm.pdf>.
- [3] Filonov P., Lavrentyev A., Vorontsov A., “Multivariate industrialtime series with cyber-attack simulation: Fault detection using an lstm-based predictive data model”, 2016, arXiv:1612.06676.

## An open-source framework for anomaly detection and forecasting of technical systems

Kozitsin V.O., Katser I.D.

Modern technical systems such as power plants are equipped with diagnostic systems. But these systems are imperfect, and accidents still happen. Accidents can lead not only to economic losses but also to socially frightening consequences, such as human-made catastrophes. Another one, that seems to be a typical, problem for Nuclear Power Plant is the excessive duplication of safety systems, which increases the cost of the NPP itself. The solution could be an advanced diagnostic system. Diagnostics as science can be divided into the main three parts: the first one is the monitoring of technical conditions; the second one is finding the root cause of anomalies; the third one is the forecasting

of the future state of a technical system. The developed framework can be used to solve all these diagnostics tasks.

**Keywords:** technical systems diagnostics, machine learning, deep learning, time series analysis, anomaly detection, time series forecasting, data preprocessing, framework

## References

- [1] *GOST R ISO 13381-1-2016 (2017) Condition monitoring and diagnostics of machines – Prognostics – Part 1: General guidelines*, IDT. Standartinform Publ., Moscow, 2019 (In Russian), 24 pp.
- [2] Chapman P., et al., *CRISP-DM 1.0: Step-by-step data mining guide*, 2000, <https://www.the-modeling-agency.com/crisp-dm.pdf>.
- [3] Filonov P., Lavrentyev A., Vorontsov A., “Multivariate industrial time series with cyber-attack simulation: Fault detection using an lstm-based predictive data model”, 2016, arXiv: 1612.06676.



# Совместное применение рекуррентных нейронных сетей и статистических методов для увеличения точности прогнозирования океанологических данных

В. Ю. Кузьмин<sup>1</sup>

Данная работа посвящена вопросам применения статистических моделей для увеличения точности прогнозирования океанологических данных. Исходный ряд наблюдений описывается с помощью смесей конечных нормальных распределений, статистические характеристики смесей используются для предварительной инициализации слоёв рекуррентной нейронной сети. Прогнозы, построенные с использованием статистических моделей, сравниваются с прогнозами, построенными для оригинальных данных. Продемонстрировано, что для всех проанализированных рядов наблюдается значительное улучшение точности.

**Ключевые слова:** EM, MSM, LSTM, нейронные сети, машинное обучение, расширение признакового пространства, смеси конечных нормальных распределений.

## 1. Введение

Нейронные сети могут быть эффективно использованы в задачах построения прогнозов и предсказания эволюции самых различных процессов. В частности, они применяются при предсказании поведения финансовых индексов [1], [2], интенсивности коммуникационного трафика [3], поведения турбулентной плазмы [4] и метеорологических данных [5].

Повышение точности прогнозов чаще всего требует либо усложнения обучаемой модели, либо сбора дополнительных данных. Оба варианта приводят к дополнительным затратам времени и ресурсов. При этом сбор дополнительных данных может быть невозможен при работе с историческими данными.

В данной работе будет обсуждено повышение точности прогнозирования с применением статистических характеристик исследуемых данных. Исходный нестационарный ряд разбивается на набор окон с применением

---

<sup>1</sup> Кузьмин Виктор Юрьевич — программист ф-та космических исследований МГУ, e-mail: shadesilent@yandex.ru

Kuzmin V.Y. — programmer, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Space Research

метода скользящего среднего, на каждом окне создаётся статистическая модель с помощью алгоритмов EM-типа [6],[7].

## 2. Методология

В качестве исходных данных выбраны шесть рядов океанологических данных. Каждый ряд содержит наблюдения за 10 лет, интервал между наблюдениями составляет 6 часов, всего в ряду 14600 наблюдений. Исходные нестационарные ряды с помощью метода скользящего среднего разбиваются на набор окон. Ширина окна выбрана в 200 наблюдений или 50 дней. Размер окна является компромиссом между необходимым количеством данных для построения статистической модели и затуханием влияния более ранних наблюдений на предсказываемый временной период.

На каждом окне с помощью метода максимизации функции правдоподобия [6] строится статистическая модель – конечная смесь нормальных распределений. В ходе исследования были рассмотрены смеси из трёх, четырёх и пяти компонент. Поскольку большую часть времени в смеси выделены одна либо две основные компоненты, в качестве итогового решения была выбрана трёхкомпонентная смесь. Для статистического обогащения данных будут применены первые четыре момента построенной модели – математическое ожидание, дисперсия, коэффициенты асимметрии и эксцесса.

Для каждого ряда рассматривается два типа прогнозов – краткосрочный и среднесрочный. Краткосрочный прогноз – прогнозирование 12 наблюдений по исходной выборке в 200 наблюдений. Среднесрочный прогноз – прогнозирование 12 наблюдений по выборке в 200 наблюдений с пропуском 28 наблюдений между концом выборки и началом прогноза.

Для каждого прогноза создаётся и оптимизируется две нейронные сети – сеть с входом из исходных данных и сеть с входом из исходных данных и инициализацией скрытого состояния сети с помощью моментов статистической модели [8]. В качестве архитектуры сети выбрана рекуррентная нейронная LSTM-сеть. В качестве метрики ошибок используется RMSE. Количество и размер слоёв, dropout, оптимизатор и иные параметры сети подбираются с помощью сеточного метода оптимизации гиперпараметров. Для построения нейронной сети использовался пакет Tensorflow для языка программирования Python, вычисления производились на гибридном высокопроизводительном вычислительном кластере.

### 3. Результаты

В таблице приведено относительное уменьшение ошибки в метрике RMSE для прогнозов, построенных с помощью статистических моделей по сравнению с прогнозами, построенными традиционным образом.

	1	2	3	4	5	6
Краткосрочный	15%	6%	10%	7%	1%	5%
Среднесрочный	17%	7%	8%	6%	1%	3%

Таблица 1. Результаты

Характерная ошибка составляет 0.07 по метрике RMSE для краткосрочных прогнозов и 0.09 для среднесрочных. Применение статистического обогащения позволяет уменьшить ошибку в среднем на 6%. При этом статистическое обогащение не приводит к значительному замедлению обучения модели и не приводит к ухудшению точности ни в одном из рассмотренных случаев.

### 4. Выводы

Применение метода статистического обогащения приводит к заметному улучшению точности прогнозирования проанализированных рядов. При этом построение статистической модели не является задачей с высокой вычислительной сложностью и не требует сбора дополнительных данных. Поскольку построенный набор моделей является локальным, то появление новых данных не приводит к необходимости перестраивания всего массива построенных моделей, что позволяет применять подход при обработке real-time задач.

Исследование выполнено при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Мозг, когнитивные системы, искусственный интеллект»

### Список литературы

- [1] Cao, Jian, Zhi Li, and Jian Li., “Financial time series forecasting model based on CEEMDAN and LSTM”, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2019, № 519, 127-139.
- [2] Yan, Binbin, and Memon Aasma., “A novel deep learning framework: Prediction and analysis of financial time series using CEEMD and LSTM.”, *Expert systems with applications*, 2020, 159.
- [3] Du, Xunsheng, et al., “Stacked LSTM deep learning model for traffic prediction in vehicle-to-vehicle communication”, *2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, 2017.

- [4] Meneghini O., Luna C.J., Smith S.P., Lao L.L., “Modeling of transport phenomenon in tokamak plasmas with neural networks”, *Physics of Plasmas*, **21**:6 (2014), 060702-0607024.
- [5] Gorshenin A. K., Kuzmin V. Y., “Neural network forecasting of precipitation volumes using patterns”, *Pattern Recognition and Image Analysis: Advances in Mathematical Theory and Applications.*, **28**:3 (2018), 450–461.
- [6] Королев В.Ю., *Вероятностно-статистические методы декомпозиции волатильности хаотических процессов*, Издательство Московского университета, Москва, 2011, 512 pp.
- [7] Gorshenin A. K., Kuzmin V. Y., “A machine learning approach to the vector prediction of moments of finite normal mixtures”, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, № 1127, 307–314
- [8] Karpathy, Andrej, and Li Fei-Fei., “Deep visual-semantic alignments for generating image descriptions”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **39**:4 (2017), 664–676

**Combined application of recurrent neural networks and statistical methods for improved oceanographic data forecasting accuracy**  
**Kuzmin V.Y.**

This paper is devoted to the application of statistical models to increase the prediction accuracy of oceanological data. The initial time series are modelled with mixtures of finite normal distributions. Statistical characteristics of constructed mixtures are used to pre-initialize the layers of a recurrent neural network. Forecasts made with the application of statistical models are compared with forecasts made using only the original data. It is demonstrated that a significant improvement in accuracy is observed for all analyzed series.

*Keywords:* EM, MSM, LSTM, neural networks, machine learning, feature enrichment, finite normal mixtures.

## References

- [1] Cao, Jian, Zhi Li, and Jian Li., “Financial time series forecasting model based on CEEMDAN and LSTM”, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2019, № 519, 127-139
- [2] Yan, Binbin, and Memon Aasma., “A novel deep learning framework: Prediction and analysis of financial time series using CEEMD and LSTM.”, *Expert systems with applications*, 2020, 159
- [3] Du, Xunsheng, et al., “Stacked LSTM deep learning model for traffic prediction in vehicle-to-vehicle communication”, *2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, 2017
- [4] Meneghini O., Luna C.J., Smith S.P., Lao L.L., “Modeling of transport phenomenon in tokamak plasmas with neural networks”, *Physics of Plasmas*, **21**:6 (2014), 060702-0607024

- [5] Gorshenin A. K., Kuzmin V. Y., “Neural network forecasting of precipitation volumes using patterns”, *Pattern Recognition and Image Analysis: Advances in Mathematical Theory and Applications.*, **28**:3 (2018), 450–461
- [6] Korolev V.Y., *Probabilistic and statistical methods for the decomposition of the volatility of chaotic processes*, Moscow University Press, Moscow, 2011 (In Russian), 512 pp.
- [7] Gorshenin A. K., Kuzmin V. Y., “A machine learning approach to the vector prediction of moments of finite normal mixtures”, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, № 1127, 307–314
- [8] Karpathy, Andrej, and Li Fei-Fei., “Deep visual-semantic alignments for generating image descriptions”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **39**:4 (2017), 664–676

# Оценка позы человека как задача классификации

Ю. В. Проничкин<sup>1</sup> М. И. Кумсков<sup>2</sup>

В докладе рассмотрена актуальная задача машинного обучения - восстановление позы человека по его изображению. Предложен новый способ постановки задачи как задачи классификации каждого пикселя изображения. В предложенной постановке реализовано решение, проведено сравнение с существующим регрессионным подходом.

**Ключевые слова:** оценка позы человека, свёрточные нейронные сети, обнаружение ключевых точек

## 1. Актуальность задачи

Ключевым шагом к пониманию людей на изображениях и видео является точная оценка позы. Учитывая одно изображение RGB, мы хотим определить точное расположение в пикселях важных ключевых точек тела. Достижение понимания позы человека и артикуляции конечностей полезно для задач более высокого уровня, таких как распознавание действий, а также служит фундаментальным инструментом в таких областях, как взаимодействие человека с компьютером и анимация.

В статье [1] был предложен метод оценивания результатов и прогресса в обучении спортсменов в женских видах спорта при выполнении ими упражнений на основе системы захвата движений (motioncapture), и построении модели «проволочного человечка» -Stickman-a, являющейся моделью позы гимнастки. Такая модель позволяет проводить сравнение позы ученицы относительно эталонной позы. Сравнивание производится попарно, по всем кадрам видеозаписи выполнения упражнения ученицы и видео наставника.

---

<sup>1</sup>Проничкин Юрий Викторович — аспирант каф. вычислительной математики мех.-мат. ф-та МГУ, e-mail: uramur@mail.ru.

Pronichkin Iurii — graduate student, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Mechanics and Mathematics, Chair of computational mathematics.

<sup>2</sup>Кумсков Михаил Иванович — д.ф.-м.н., профессор каф. вычислительной математики мех.-мат. ф-та МГУ, e-mail: kumskov@mail.ru.

Kumskov Mikhail — Doctor of Physico-mathematical Sciences, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Mechanics and Mathematics, Chair of computational mathematics.

## 2. Существующие подходы к решению

Поза человека - набор из  $m$  пар координат  $(x_i, y_i)$  ключевых точек (например голова, кисти, плечи и т.д.) для каждого человека. Формально, кроме оценки позы (pose estimation) эта задача также эквивалентна задаче обнаружения ключевых (keypoint detection), использующаяся, например, для определения таких точек на лицах с последующей идентификацией человека.

Самый простой способ оценки позы - предсказывать эти координаты напрямую, т.е., имея на вход картинку, нейронная сеть должна выдавать для каждой опорной точки пару координат. Такой способ действительно просто реализуем, но с ним возникнут проблемы, как только на изображении окажется более двух человек, тем не менее есть способы, решающие эту проблему [2].

Задача оценки позы схожа с задачей семантической сегментации, в более современных работах был предложен новый способ. Он заключается в следующем: нейронная пытается предсказывать "карту уверенности позы" (pose heatmap), которая позднее декодируется в сами координаты [3].

Для каждого изображения карта уверенности - тензор размера  $N_o \times N_o \times C_o$ , где  $N_o$ ,  $N_o$  разрешение карты, а  $C_o$  -  $m$ , то есть количество узлов (joints, keypoints), каждый элемент тензора - уверенность в то, что в соответствующем пикселе изображения находится та или иная ключевая точка.

Обучающий набор данных состоит из пар  $(X_i, Y_i)$ , в котором  $X_i$  - изображения,  $Y_i$  - целевая карта уверенности. В современных алгоритмах для обучения используется карта, полученная следующим способом:

$$Y_{ij,xy} = \sum_{k=0}^n e^{-\frac{(x-x_{jk})^2 + (y-y_{jk})^2}{2\sigma^2}}$$

эта величина моделирует плотность многомерного нормального распределения с независимыми одинаково-распределенными компонентами.

Здесь  $x_{jk}, y_{jk}$  - известные узлы (joints) на предварительно размеченном изображении, суммирование происходит по всем таким узлам (если например на изображении несколько человек),  $\sigma$  - параметр, обычно его берут равным 1.5,  $j$  - номер узла (например голова, левая рука, правая рука и т.д.).  $k$  - номер человека на изображении.

## 3. Предлагаемый подход

Во-первых, как и в задаче сегментации к целевому тензору добавляется канал, отвечающий за фон, т.е. такая матрица, элементы которой

являются вероятностями отсутствия всех узлов. Во-вторых, меняется целевая карта уверенности (k пробегает узлы, l пробегает позы):

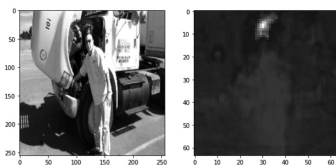
$$Y_{ij,xy} = \sum_k I[x = x_{j_k}] I[y = y_{j_k}] Y_{i(k+1),xy} = 1 - \sum_j \sum_l I[x = x_{j_l}] I[y = y_{j_l}]$$

И самое главное, сама задача меняется на задачу многоклассовой классификации. В такой постановке выход нейронной сети для каждого пикселя карты уверенности - это набор  $k + 1$  честной вероятности, а не уверенности.

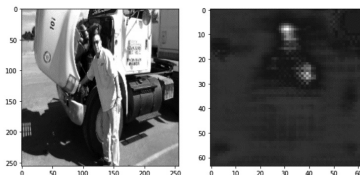
Как и во многих моделях задачи обнаружения объектов, здесь возникает проблема - дисбаланс классов - фона намного больше, чем всего остального. Эту проблему можно также решать с помощью техники *hard negative mining* [4], что и было сделано в этой работе. Применение этой техники дало результат - на выходе начали появляться достаточно хорошие карты уверенности.

Дальнейшее изучение поведения карт уверенности привело к следующей идее - выбрать функцию потерь, которая бы сбалансировала потерю на фоне и на не фоне, т.е. чтобы эти значения были одного порядка.

На рисунке ниже показаны карты уверенности модели после 15 эпох обучения, слева в предлагаемой классификационной постановке, справа в существующей регрессионной



Регрессия



Классификация

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках реализации программы Московского центра фундаментальной и прикладной математики по соглашению №075-15-2019-1621», Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Мозг, когнитивные системы, искусственный интеллект» и гранта РФФИ 19-07-00752

## Список литературы

- [1] Маьмуров Б.Б., Кумсков М.И., Проничкин Ю.В, Ильясова А.О, “Конструирование позы человека по фотографии на основе нейронных сетей глубокого обучения”, *Дурдона*, Материалы конференции Инновационные технологии в спорте и физическом воспитании под-



растающего поколения (наприѐти Бухара, Республика Узбекистан, 2019), **18**, Тезисы докладов, 2019, 63–65.

- [2] Alexander Toshev, Christian Szegedy, *DeepPose: Human Pose Estimation via Deep Neural Networks*, arXiv: abs/1312.4659.
- [3] Shih-En Wei, Varun Ramakrishna, Takeo Kanade, Yaser Sheikh, *Convolutional Pose Machines*, arXiv: abs/1602.00134v4.
- [4] Wei Liu, Dragomir Anguelov, Dumitru Erhan, Christian Szegedy, *SSD: Single Shot MultiBox Detector*, arXiv: abs/1512.02325v5.

### **Human pose estimation as a classification problem Pronichkin I.V., Kumskov M.I.**

The report considers an urgent problem of machine learning – the human pose estimation based on his image. A new way of setting the problem as the problem of classifying each pixel of the image is proposed. In the proposed formulation, the solution is implemented, a comparison with the existing regression approach is made.

*Keywords:* human pose estimation, convolutional neural networks, keypoint detection.

## **References**

- [1] Mamurov B.B., Kumskov M.I., Pronichkin I.V., Ilyasova A.O., “Constructing a Human Pose from a Photo Based on Deep Learning Neural Networks”, *Durdona*, Conference materials Innovative technologies in sports and physical education of the younger generation (Bukhara Publishing House, Republic of Uzbekistan, 2019), **18**, Тезисы докладов, 2019, 63–65 (In Russian).
- [2] Alexander Toshev, Christian Szegedy, *DeepPose: Human Pose Estimation via Deep Neural Networks*, arXiv: abs/1312.4659.
- [3] Shih-En Wei, Varun Ramakrishna, Takeo Kanade, Yaser Sheikh, *Convolutional Pose Machines*, arXiv: abs/1602.00134v4.
- [4] Wei Liu, Dragomir Anguelov, Dumitru Erhan, Christian Szegedy, *SSD: Single Shot MultiBox Detector*, arXiv: abs/1512.02325v5.

# Использование сверточных нейронных сетей для реидентификации людей в городских условиях

Е. П. Сучков<sup>1</sup>, Г. О. Алексеенко<sup>2</sup>, К. В. Налчаджи<sup>3</sup>

В настоящее время все более широкое распространение получают различные системы видеофиксации. Одной из основных целей таких систем является контроль и слежение за человеком. Решение данной задачи позволяет в дальнейшем решать такие прикладные задачи, как контроль заполненности различных помещений (будь то торговые объекты или образовательно-культурные учреждения), построение тепловой карты перемещений человека, организация контроля доступа к тому или иному объекту. В работе предложен способ, основанный на применении комбинации различных нейронных сетей, который позволяет решать данные задачи с высокой точностью.

**Ключевые слова:** глубокое обучение, нейронные сети, реидентификация, Mask R-CNN, OsNet, ResNet.

Реидентификация человека является одной из основных задач в многокамерном видеонаблюдении, которое широко распространено на сегодняшний день. При решении данной проблемы подразумеваются, что изображения одного и того же человека могут быть получены с камер с неперекрывающимися ракурсами. В связи с этим, в задаче можно выделить следующие основные трудности:

- 1) Аккуратное обнаружение человека и способность отличить его от фона.
- 2) Непохожесть изображений одного и того же человека, полученных с разных ракурсов.
- 3) Сходство внешних признаков одного человека с признаками другого в местах массового скопления людей, общественных местах.

---

<sup>1</sup> *Сучков Егор Петрович* — ассистент факультета ВМК МГУ имени М.В. Ломоносова, e-mail: suchkov.egor@gmail.com.

Suchkov Egor Petrovich — assistant of CMC Faculty, Lomonosov MSU

<sup>2</sup> *Алексеенко Григорий Олегович* — главный инженер по разработке ПАО Сбербанк, e-mail: grigoriyalexeenko@gmail.com.

Alekseenko Grigoriy Olegovich — chief development engineer, PJSC Sberbank

<sup>3</sup> *Налчаджи Карен Витальевич* — аспирант КБНЦ РАН, e-mail: nalkar07@yandex.ru.

Nalchadzhi Karen Vitalievich — graduate student, KBSC RAS



Рис. 1. Проблема 1. Выделение человека на фоне.



Рис. 2. Проблема 2. Различие изображение одного и того же человека с разных ракурсов.

В работе продолжены методы решения всех вышеописанных проблем. Для решения задачи отделения человека от фона предлагается использовать комбинацию сверточных сетей SSD-ResNet34[1] и Mask R-CNN[2], хотя допускается и применение классических подходов компьютерного зрения[3][4]. Для решения пунктов 2-3, предложено использовать сеть OsNet[5], при обучении которой применялся новый подход различных аугментаций фона. Сеть обучалась на, порядка, 30 000 уникальных персонажах.



Рис. 3. Проблема 3. Сходство между разными людьми на примере 5 различных персон.

Предложенный в работе подход был протестирован различных наборах данных, включая публичные датасеты[6][7] и собственный скрытый, не участвовавший в обучении датасет.

Название датасета \ выборки	Полученная точность	
	1 лучшая гипотеза	5 лучших гипотез
WildTrack + Market-1501 (313+1501 уникальных человека), участвовала в обучении	94%	98%
Скрытый датасет (~43000 уникальных человека), не участвовала в обучении	84%	92%

В сравнении с оригинальной сетью OsNet, предложенный подход позволил достичь прироста в 9% точности для сравнения по лучшей гипотезе и прироста в 5% точности для сравнения по 5 лучшим гипотезам[5], что говорит о возможности применения данного подхода и с другими реидентификационными сетями.

## Список литературы

- [1] Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren, Jian Sun, “Deep Residual Learning for Image Recognition”, *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2015.

- [2] Kaiming He, Georgia Gkioxari, Piotr Dollár, Ross Girshick, “Mask R-CNN”, *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018.
- [3] Paul Viola, Michael Jones, “Robust Real-time Object Detection”, *International Journal of Computer Vision*, 2001.
- [4] Lucas, Bruce and Kanade, Takeo, “An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision (IJCAI)”, *Proceedings of Imaging Understanding Workshop*, 1981.
- [5] Kaiyang Zhou, Yongxin Yang, Andrea Cavallaro, Tao Xiang, “Omni-Scale Feature Learning for Person Re-Identification”, *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2019, <https://paperswithcode.com/paper/omni-scale-feature-learning-for-person-re/> review/?hl=5187, arXiv: <https://arxiv.org/abs/1905.00953>.
- [6] Zheng, Liang and Shen, Liyue and Tian, Lu and Wang, Shengjin and Wang, Jingdong and Tian, Qi, “Scalable Person Re-identification: A Benchmark”, *Computer Vision, IEEE International Conference on*, 2015.
- [7] T. Chavdarova; P. Baqué; A. Maksai; S. Bouquet; C. Jose et al., “WILDTRACK: A Multi-camera HD Dataset for Dense Unscripted Pedestrian Detection”, *Proceedings of the IEEE international conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018, 5030–5039.

## CNN networks using for person re-identification in urban scenes Suchkov Egor, Alekseenko Grigoriy, Nalchadzhi Karen

Currently, video surveillance systems are becoming more widespread. One of the main goals of such systems is to control and track a person’s movement. The solution of this problem allows us to solve such applied problems as tracking the occupancy of various premises (whether shopping facilities or educational and cultural institutions), creating a motion heatmap or organizing control of access to a particular object. The present paper proposes a method based on a combination of various neural networks, which allows solving these problems with high accuracy.

*Keywords:* Deep Learning, convolutional neural network, ReID, Mask R-CNN, OsNet, ResNet.

## References

- [1] Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren, Jian Sun, “Deep Residual Learning for Image Recognition”, *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2015.
- [2] Kaiming He, Georgia Gkioxari, Piotr Dollár, Ross Girshick, “Mask R-CNN”, *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018.
- [3] Paul Viola, Michael Jones, “Robust Real-time Object Detection”, *International Journal of Computer Vision*, 2001.
- [4] Lucas, Bruce and Kanade, Takeo, “An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision (IJCAI)”, *Proceedings of Imaging Understanding Workshop*, 1981.

- [5] Kaiyang Zhou, Yongxin Yang, Andrea Cavallaro, Tao Xiang, “Omni-Scale Feature Learning for Person Re-Identification”, *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2019, <https://paperswithcode.com/paper/omni-scale-feature-learning-for-person-re/review/?hl=5187>, arXiv: <https://arxiv.org/abs/1905.00953>.
- [6] Zheng, Liang and Shen, Liyue and Tian, Lu and Wang, Shengjin and Wang, Jingdong and Tian, Qi, “Scalable Person Re-identification: A Benchmark”, *Computer Vision, IEEE International Conference on*, 2015.
- [7] T. Chavdarova; P. Baqué; A. Maksai; S. Bouquet; C. Jose et al., “WILDTRACK: A Multi-camera HD Dataset for Dense Unscripted Pedestrian Detection”, *Proceedings of the IEEE international conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018, 5030–5039.

# Автоматическая идентификация минералов на изображениях аншлифов с использованием глубокого обучения

А. В. Хвостиков<sup>1</sup>, А. С. Крылов<sup>2</sup>, Д. М. Коршунов<sup>3</sup>,  
М. А. Богуславский<sup>4</sup>

Автоматическая идентификация минералов на изображениях аншлифов очень востребована в исследовательской геологии, поскольку позволяет значительно сократить время, затрачиваемое специалистом на изучение руд, и автоматически получать качественную статистику распределения минералов различных месторождений. В этой работе мы предлагаем алгоритм глубокого обучения для автоматической идентификации минералов на изображениях полированных аншлифов и представляем набор данных LumenStone, который объединяет изображения аншлифов различных минеральных ассоциаций и содержит маски семантической сегментации пиксельного уровня.

**Ключевые слова:** сегментация изображений, глубокое обучение, геология, идентификация минералов, аншлифы, руда.

---

<sup>1</sup>*Хвостиков Александр Владимирович* — к.ф.-м.н., младший научный сотрудник лаборатории математических методов обработки изображений, каф. математической физики, ф-та ВМК, МГУ, e-mail: khvostikov@cs.msu.ru

Khvostikov Alexander Vladimirovich — researcher, Laboratory of Mathematical Methods of Image Processing, Department of Mathematical Physics, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, MSU

<sup>2</sup>*Крылов Андрей Серджевич* — д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией математических методов обработки изображений, каф. математической физики, ф-та ВМК, МГУ, e-mail: kryl@cs.msu.ru

Krylov Andrey Serdjevich — professor, head of Laboratory of Mathematical Methods of Image Processing, Department of Mathematical Physics, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, MSU

<sup>3</sup>*Коршунов Дмитрий Михайлович* — инженер кафедры геологии, геохимии и экономики полезных ископаемых геологического ф-та МГУ, e-mail: dmit0korsh@gmail.com

Korshunov Dmitry Mikhailovich — engineer, Department of Geology, Geochemistry and Economics of Mineral Resources, Geological Faculty, Moscow State University

<sup>4</sup>*Богуславский Михаил Александрович* — к.г.-м.н., доцент кафедры геологии, геохимии и экономики полезных ископаемых геологического ф-та МГУ, e-mail: mboguslavskiy@yandex.ru

Boguslavskiy Mikhail Alexandrovich — assistant professor, Department of Geology, Geochemistry and Economics of Mineral Resources, Geological Faculty, Moscow State University

# 1. Введение

Существующие программные решения для определения минералов по фотографиям шлифов можно разделить на два типа: использующие цвето-яркостные характеристики изображений [1], и использующие статистические принципы для определения минералов в конкретном образце [2, 3].

Хотя оба типа методов могут решить некоторые проблемы идентификации минералов, каждый из них имеет ряд существенных недостатков и не является универсальным и требует точной калибровки.

В настоящее время, в связи с развитием методов искусственного интеллекта, возникла возможность создать метод решения задачи, основанный на использовании глубокого обучения, и демонстрирующий принципиально более качественные результаты.

## 2. Используемые данные

Для создания и сравнения различных алгоритмов автоматической идентификации минералов на изображениях шлифов в МГУ имени М.В. Ломоносова нами был создан набор данных LumenStone (<https://imaging.cs.msu.ru/en/research/geology/lumenstone>), содержащий пиксельные семантические маски минералов для изображений аншлифов. Набор данных LumenStone состоит из нескольких поднаборов, соответствующих различным минеральным ассоциациям. Материал был собран с 30 рудных месторождений СНГ, пробы представляют основные рудные ассоциации и сгруппированы по генезису месторождения. Все изображения сделаны с увеличением  $\times 100$  и имеют разрешение  $3396 \times 2547$ . На данный момент в наборе содержится данные для 12 различных минералов.

## 3. Разработанный алгоритм

В этой работе используется свёрточная нейронная сеть на основе архитектуры U-Net [4] со слоями пакетной нормализации [5] для семантической сегментации изображений аншлифов. Для улучшения обучения и преодоления проблемы исчезающих градиентов, добавлены остаточные связи внутри блоков свертки, аналогично [6] (Рис. 1).

Основной проблемой, возникающей при сегментации геологических изображений, является несбалансированность данных. Например, в поднаборе LumenStone S1 количество пикселей, соответствующих халькопириту (Csp), в 17 раз меньше числа пикселей, соответствующих фону



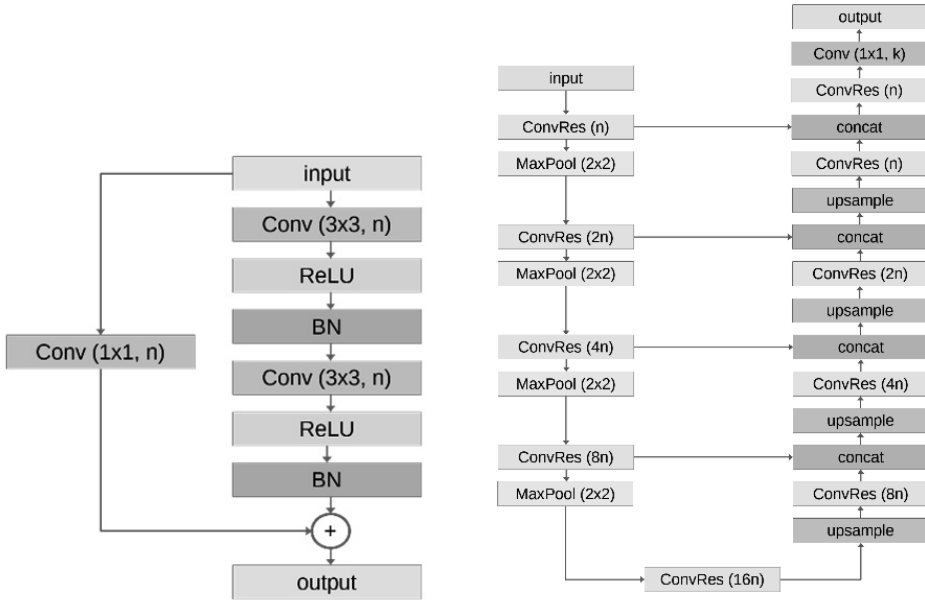


Рис. 1. Используемый ConvRes блок и архитектура разработанной нейросетевой модели.

(BG). Для преодоления проблемы дисбаланса данных при обучении нейросетевой модели мы используем модифицированную версию метода балансировки данных, предложенного ранее в [7]. Это позволяет повысить точность распознавания редко присутствующих минералов.

Модель была обучена на 59 изображениях из LumenStone S1 в течение 50 эпох с оптимизатором Adam, начальным значением скорости обучения  $10^{-3}$  и автоматическим снижением скорости обучения в 10 раз на плато. На тестовом наборе LumenStone S1 обученная модель продемонстрировала следующие значения меры качества IoU: 0.86 для фона (BG), 0.71 для халькопирита (Csp), 0.48 для галенита (Gl), 0.67 для борнита (Brt), 0.89 для пирита / марказита (Py / Mrc), 0.82 для сфалерита (Sph) и 0.34 для тенантит-тетраэдритовой группы (Tnt / Ttr). Общее количество правильно распознанных пикселей 94.6%. Пример работы обученной нейросетевой модели приведен на Рис. 2.

## 4. Разработанное ПО

Для удобства использования специалистами-геологами было разработано и зарегистрировано (свидетельство 2021616571) кроссплатформен-

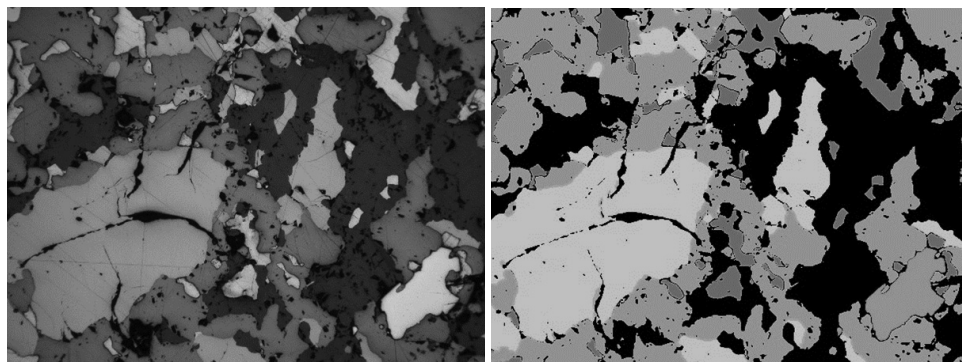


Рис. 2. Пример работы обученной нейросетевой модели. Слева исходное изображение, справа предсказанная разметка.

ное ПО с графическим интерфейсом для тестирования и визуализации результатов предложенного метода идентификации минералов. Интерфейсная часть реализована с помощью JS и фреймворка Electron, бэкенд часть реализована на Python 3. ПО позволяет загружать изображения, визуализировать маски, выполнять идентификацию минералов с помощью обученной нейросетевой модели, визуализировать результаты и вычислять простую статистику по распределению минералов.

## 5. Заключение

В рамках проекта планируется существенно расширить набор данных LumenStone, провести дополнительное тестирование устойчивости разработанного метода сегментации при варьировании условий съемки, а также используемых объективов. Кроме того, планируется разработать новые алгоритмы и методы для улучшения качества автоматической идентификации минералов на изображениях шлифов.

## 6. Благодарность

Работа выполнена при поддержке научно-образовательной школы МГУ "Мозг, когнитивные системы, искусственный интеллект".

## Список литературы

- [1] 1. López-Benito A. et al., "Automated ore microscopy based on multispectral measurements of specular reflectance. I—A comparative

- study of some supervised classification techniques”, *Minerals Engineering*, **146** (2020), 106136.
- [2] Berrezueta E. et al., “Ore petrography using optical image analysis: application to Zaruma-Portovelo deposit (Ecuador)”, *Geosciences*, **6**:2 (2016), 30.
- [3] Köse C., Alp İ., İkibaş C., “Statistical methods for segmentation and quantification of minerals in ore microscopy”, *Minerals Engineering*, **30** (2012), 19–32.
- [4] Ronneberger O., Fischer P., Brox T., “U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation”, International Conference on Medical image computing and computer-assisted intervention (Springer, Cham), 2015, 234–241.
- [5] Ioffe S., Szegedy C., “Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift”, International conference on machine learning (PMLR), 2015, 448–456.
- [6] Zhang Z., Liu Q., Wang Y., *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, **15**:5 (2018), 749–753.
- [7] A. Kochkarev, A. Khvostikov, D. Korshunov et al., “Data balancing method for training segmentation neural networks”, *CEUR Workshop Proceedings*, **2744** (2020), 1–10.

## **Deep learning-based automatic identification of minerals in images of polished sections**

**Khvostikov A.V., Krylov A.S., Korshunov D.M., Boguslavskiy M.A.**

Automatic identification of minerals in images of polished section is highly demanded in exploratory geology since it can significantly reduce the time spent by a human expert in the study of ores, automatically provide high quality statistics of mineral distribution of different deposits. In this work we propose a deep-learning based algorithm for automatic identification of minerals in images of polished sections and present LumenStone dataset which unites high-quality geological images of different mineral associations and provides pixel-level semantic segmentation masks.

*Keywords:* Image Segmentation, Deep Learning, Geology, Mineral Identification, Polished Sections, Ore.

## References

- [1] I. López-Benito A. et al., “Automated ore microscopy based on multispectral measurements of specular reflectance. I—A comparative study of some supervised classification techniques”, *Minerals Engineering*, **146** (2020), 106136.
- [2] Berrezueta E. et al., “Ore petrography using optical image analysis: application to Zaruma-Portovelo deposit (Ecuador)”, *Geosciences*, **6**:2 (2016), 30.
- [3] Köse C., Alp İ., İkibaş C., “Statistical methods for segmentation and quantification of minerals in ore microscopy”, *Minerals Engineering*, **30** (2012), 19–32.
- [4] Ronneberger O., Fischer P., Brox T., “U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation”, International Conference on Medical image computing and computer-assisted intervention (Springer, Cham), 2015, 234–241.
- [5] Ioffe S., Szegedy C., “Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift”, International conference on machine learning (PMLR), 2015, 448–456.
- [6] Zhang Z., Liu Q., Wang Y., *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, **15**:5 (2018), 749–753.
- [7] A. Kochkarev, A. Khvostikov, D. Korshunov et al., “Data balancing method for training segmentation neural networks”, *CEUR Workshop Proceedings*, **2744** (2020), 1–10.

## Часть 6.

Интеллектуальное управление,  
роботы и биомехатронные системы

# Применение рекуррентной нейронной сети для идентификации динамики стенда типа центрифуги

Г. С. Бугрий<sup>1</sup>

Предложен алгоритм построения идентификатора на базе рекуррентной нейронной сети и показана его применимость на динамическом стенде типа центрифуги.

**Ключевые слова:** рекуррентная нейронная сеть, непараметрическая идентификация, центрифуга, динамическая имитация.

## 1. Введение

В задачах управления нелинейными динамическими системами обычно требуется наличие адекватной математической модели в пространстве состояний. Обычно по экспериментальным данным входных и выходных сигналов строится параметрическая либо непараметрическая модель рассматриваемой системы. В случае наличия информации об уравнениях модели, задача обычно сводится к идентификации параметров системы. Далеко не всегда удается дать адекватное математическое описание процессов, происходящих в системе, либо сама система может представляться "черным ящиком". В таких случаях применима непараметрическая идентификация, то есть идентификация динамики системы.

Подобные проблемы часто встречаются в задачах управления различными кинематическими схемами, на которых базируются динамические тренажерные стенды. В данной работе рассматривается динамический стенд типа центрифуги с управляемым кардановым подвесом, для которого предлагается метод построения непараметрической адаптивной модели на базе рекуррентной нейронной сети.

## 2. Основной раздел

На рисунке 1 представлена схема рассматриваемого стенда. Управление осуществляется согласно алгоритму динамической имитации сенсорного

---

<sup>1</sup>*Бугрий Григорий Степанович* — младший научный сотрудник лаборатории математического обеспечения имитационных динамических систем мех.-мат. ф-та МГУ, e-mail: gregbugr@vrmsu.ru.

Bugriy Grigory Stepanovich — junior researcher, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Mechanics and Mathematics, MOIDS laboratory.

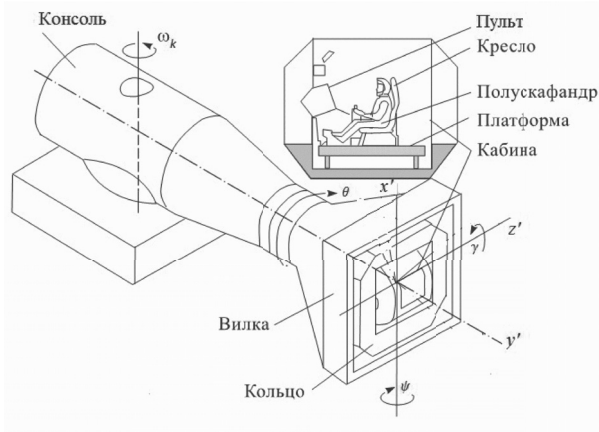


Рис. 1. Динамический стенд «Центрифуга ЦФ-18» с трёхстепенным кардановым подвесом в Центре подготовки космонавтов им. Ю. А. Гагарина

конфликта невесомости [1], [2] по следующим законам: угловая скорость вращения консоли

$$\omega = \omega_0 + \omega_1 \cdot \sin 2\pi\nu t, \quad (1)$$

где  $\omega_0$  и  $\omega_1$  выбираются так, чтобы величина  $\max \omega^2 l / g_0$  находилась в диапазоне 0.2 – 0.3, частота  $\nu$  – в диапазоне 0.1 – 0.3 Гц, а  $g_0$  и  $l$  – модуль ускорения свободного падения и длина плеча центрифуги соответственно. В то же время, вилка закреплена на угол  $\theta = 90^\circ$ , а кольцо и кабина меняют свои положения согласно:

$$\begin{aligned} \psi &= \frac{\pi}{2} + \arctan S_0, \quad \gamma = \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{S_1}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}, \\ S_0 &= \frac{\omega^2 l}{g_0}, \quad S_1 = \frac{\dot{\omega} l}{g_0}, \quad S_2 = \sin \psi - S_0 \cos \psi. \end{aligned} \quad (2)$$

Работу стенда будем рассматривать как «черный ящик» с входом  $u$  и выходом  $x$  – показаниями акселерометров, расположенных в кабине:

$$u = \left[ \frac{\omega^2 l}{g_0}, \psi, \gamma \right]^T, \quad x = [x_0, x_1, x_2]^T. \quad (3)$$

В качестве адаптивного идентификатора системы будем использовать рекуррентную нейронную сеть вида

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1) &= A\hat{x}(k) + \check{W}_1(k)\sigma(\hat{x}(k)) + \check{W}_2(k)\varphi(\hat{x}(k))u(k), \\ \check{W}_1(k) &= \frac{W_1(k+1) + W_1(k)}{2}, \quad \check{W}_2(k) = \frac{W_2(k+1) + W_2(k)}{2}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\hat{x}(k)$  – оценка вектора состояния на  $k$ -ом шаге,  $\sigma(\hat{x}(k)): \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^6$  и  $\varphi(\hat{x}(k)): \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^{6 \times 3}$  – функции активации, представленные в виде сигмоидальных функций

$$\sigma_i(\hat{x}(k)) = a_i(1 + e^{-b_i \hat{x}(k)})^{-1}, \quad \varphi_{i,j}(\hat{x}(k)) = c_{i,j}(1 + e^{-d_{i,j} \hat{x}(k)})^{-1}. \quad (5)$$

Веса  $W_1 \in \mathbb{R}^{3 \times 6}$ ,  $W_2 \in \mathbb{R}^{3 \times 6}$  итеративно находятся на каждом новом шаге  $k+1$  по законам, описанным в работе [3], что принято называть процессом обучения. Особенностью нейронных сетей подобного рода является постоянный процесс нахождения весов, зависящих от ошибки оценки вектора состояния на предыдущем шаге  $\Delta(k) = x(k) - \hat{x}(k)$ , значений функций активации (5), текущего состояния самих весов и, в случае веса  $\check{W}_2$ , входного сигнала  $u(k)$ . Также в закон обучения входят матрицы  $A \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  и  $P \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ , удовлетворяющие уравнению Риккати,  $A$  устойчива, а  $P$  симметрическая, положительно определенная.

### 3. Постановка и решение задачи нейроидентификации

Основной целью данной работы является создание идентификатора удовлетворяющего следующему критерию: построение идентификатора будем считать успешным, если после обучения РНН (4) на экспериментальных данных, подача нового входного сигнала  $u^*(k)$ , с тем же периодом, но с другой амплитудой, приводит к адекватному поведению модели при использовании уже найденных ранее весов  $\check{W}_1(k)$ ,  $\check{W}_2(k)$ .

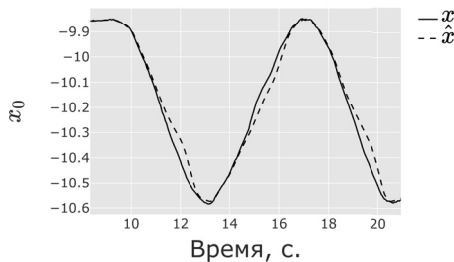


Рис. 2. Идентификация с обучением

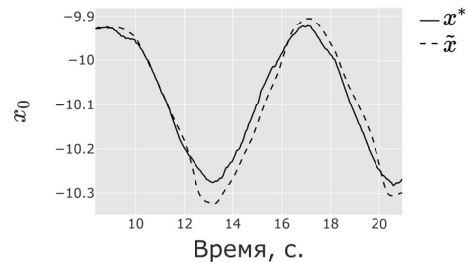


Рис. 3. Идентификация без обучения

$$\tilde{x}(k+1) = A\tilde{x}(k) + \check{W}_1(k)\sigma(k) + \check{W}_2(k)\varphi(k)u^*(k), \quad (6)$$



$\tilde{x}$  – оценка вектора состояния при новом входном сигнале  $u^*$ .

Было проведено два эксперимента с разными амплитудами подаваемого управления. В результате обучения нейросети на данных  $(u, x)$  с большей амплитудой (рисунок 2), получен удовлетворительный результат работы идентификатора на выборке  $(u^*, x^*)$  с меньшей амплитудой (рисунок 3). Построенный идентификатор показал свою работоспособность для определения неизвестной динамики в пространстве состояния и в дальнейшем послужит основой для решения задачи управления.

## Список литературы

- [1] В. А. Садовничий, В. В. Александров, Т. Б. Александрова, Т. Г. Астахова, Ю. О. Мамасуева, Л. И. Воронин, А. В. Мамасуев, “Математическое моделирование физиологических систем и динамическая имитация сенсорного конфликта невесомости”, *Фундамент. и прикл. матем.*, **3:1** (1997), 129–147.
- [2] В. В. Александров, С. С. Лемак, “Алгоритмы динамической имитации для стенда-тренажёра пилотируемых полетов на базе центрифуги с управляемым кардановым подвесом”, *Фундамент. и прикл. матем.*, **22:2** (2018), 19–32.
- [3] I. Salgado and I. Chairez, “Nonlinear discrete time neural network observer”, *Neurocomputing*, **101** (2013), 73–81.

## Application of a recurrent neural network to identify dynamics of a centrifuge-type stand Bugriy Grigory Stepanovich

An algorithm for an identifier design based on a recurrent neural network is proposed and its applicability on a centrifuge-type stand.

*Keywords:* recurrent neural network, non-parametric identifier, centrifuge, motion cueing.

## References

- [1] V. A. Sadovnichy, V. V. Alexandrov, T. B. Alexandrova, T. G. Astahova, Yu. O. Mamasueva, L. I. Voronin, A. V. Mamasuev, “Physiological systems mathematical modelling and weightlessness sensory conflict dynamic simulation”, *Fundamentalnaya i prikladnaya matematika*, **3:1** (1997), 129–147 (In Russian).

- [2] V. V. Alexandrov, S. S. Lemak, “Algorithms of dynamic piloted flight simulator stand based on a centrifuge with a controlled Cardan suspension”, *Fundamentalnaya i prikladnaya matematika*, **22:2** (2018), 19–32 (In Russian).
- [3] I. Salgado and I. Chairez, “Nonlinear discrete time neural network observer”, *Neurocomputing*, **101** (2013), 73-81.

# Планирование движения автономного робота в лабиринте с препятствиями

Э. И. Залилов<sup>1</sup>, А. С. Долгий<sup>2</sup>, А. В. Шокуров<sup>3 4</sup>

В рамках данной работы решаем задачу планирования движения автономного робота, применяя и сравнивая классический подход решения этой задачи и подход с применением машинного обучения. Была поставлена задача “проехать из точки А в точку В” на различных экспериментальных картах, представляющих собой лабиринт с препятствиями. Мы изучали поведение двухколесного робота с разными методами построения маршрутов и разными наборами сенсоров. Предполагается, что подход с применением машинного обучения более легкий для разработки и нуждается в меньшем количестве сенсоров, что существенно снижает стоимость такого робота.

**Ключевые слова:** планирование движения; робототехника; примитивы движения; обучение с подкреплением

## 1. Классический беспилотный подход

Главная возможность автономного робота - это умение добраться из текущей точки в любую другую выбранную точку на карте, преодолевая возникающие препятствия. Классический подход планирования движения автономного робота предполагает наличие нескольких этапов: локализация, распознавание, планирование маршрута и управление.

---

<sup>1</sup>*Залилов Эмиль Ильгизович* — аспирант каф. теоретической информатики мех.-мат. ф-та МГУ, e-mail: zalilov\_emil@mail.ru

Emil Ilgizovich Zalilov — graduate student, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Mechanics and Mathematics, Chair of Theoretical Informatics.

<sup>2</sup>*Долгий Алексей Сергеевич* — аспирант каф. теоретической информатики мех.-мат. ф-та МГУ, e-mail: dolgy62@mail.ru

Dolgyy Aleksey Sergeevich — graduate student, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Mechanics and Mathematics, Chair of Theoretical Informatics.

<sup>3</sup>*Шокуров Антон Вячеславович* — к.ф.-м.н., научный сотрудник лаборатории вычислительных методов механико-математического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова, e-mail: shokurov.anton.v@yandex.ru

Shokurov Anton Vyacheslavovich — Ph.D., research associate of Computational Methods Laboratory of Mechanics and Mathematics Faculty of Lomonosov Moscow State University

<sup>4</sup>Исследование выполнено при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Мозг, когнитивные системы, искусственный интеллект»

This research has been supported by the Interdisciplinary Scientific and Educational School of Moscow University «Brain, Cognitive Systems, Artificial Intelligence»

На этапе локализации роботу необходимо понимать, где он находится в данный момент времени. В зависимости от поставленной задачи и имеющихся сенсоров для локализации могут быть применены различные методы, такие как GNSS, Одометрия, EKF, ICP, часть из которых описано в [3].

На этапе распознавания роботу необходимо распознать значимые окружающие его объекты. Для того, чтобы робот мог успешно обойти все препятствия, ему необходимо уметь отличить возникающие препятствия и классифицировать их. В результате должно быть получено виртуальное представление внешней среды.

Робот должен спланировать маршрут. При планировании маршрута так же существует несколько разных подходов каждый из которых может быть использован в зависимости от поставленной задачи и имеющихся ограничений. Для построения наиболее оптимального пути, при этом реагируя на все возникающие препятствия, используется двухуровневая архитектура планирования пути. Глобальный планировщик работает в паре с локальным планировщиком, дополняя друг друга. Глобальный планировщик занимается долгосрочным планированием пути, используя доступную информацию о местности и не учитывая неожиданные препятствия. Алгоритм построения пути [6]:

- Дискретизируем пространство и выбираем примитивы движения (рис. 1)
- Строим граф (рис. 1)
- Ищем наиболее короткие пути: Алгоритм Дейкстры,  $A^*$  (используется чаще остальных, более подробно в [6, 2]), Rapidly exploring random tree(RRT)

Робот должен как то автономно управляться. На этом этапе выполняется заданная планировщиком траектория.

Для решения поставленной в этой работе задачи наш робот должен уметь построить карту местности. Для этого необходимо проехаться по разным маршрутам местности, используя один из доступных алгоритмов построения карт. Опять таки методов достаточно много, они отличаются точностью и применяемыми сенсорами. Есть варианты без визуальной одометрии, использующие только лидары. Однако, они будут уступать в точности алгоритмам визуальной одометрии, которая позволяет оценить перемещение робота, его текущую позицию и ускорение на основе данных видеопотока с камеры.

В зависимости от сложности местности, по которой придется передвигаться роботу, возможно использование разных наборов сенсо-

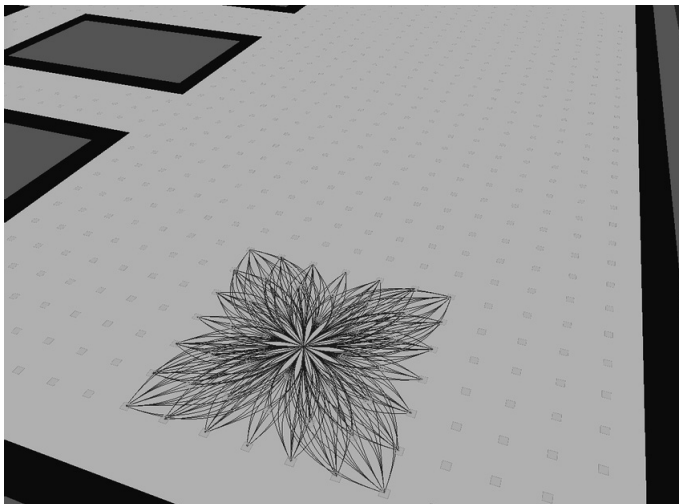


Рис. 1. Дискретизированное пространство и построенный на нем граф примитивов движения

ров(лидары, камеры, радары). Однако, каждый из наборов будет требовать адаптации и поддержки каждого из модулей планирования движения, что сильно усложняет разработку такой системы.

## 2. Использование обучения с подкреплением

Для обучения с подкреплением (Reinforcement Learning)[4, 7] необходимо построить модель, содержащую агента (в нашем случае - робота), среду (лабиринт, см. Рис. 2), а также множества действий доступных агенту и множество состояний среды (см. Рис 3.).

Кроме того необходимо знать функции перехода из одного состояния в другое при конкретном действии, но в нашем случае этим занимается сам симулятор. Робот на каждом этапе выбирает и совершает действие из набора доступных действий, получает за это награду (возможно отрицательную), и среда переходит в новое состояние.

На первом этапе необходимо определиться с вариантами структуры модели обучения с подкреплением, в нашем случае, в качестве действий можно, например, взять два действия: движение робота вперед и вращение. А также давать награды за движение, а штрафовать за столкновение со стенами. Однако на практике, этот вариант себя показал плохо, поскольку почти всегда робот очень быстро учится просто крутиться на месте. В качестве “состояний среды” - используются дискретизированные данные с лидара. Обучение практиковалось по разным алгоритмам:

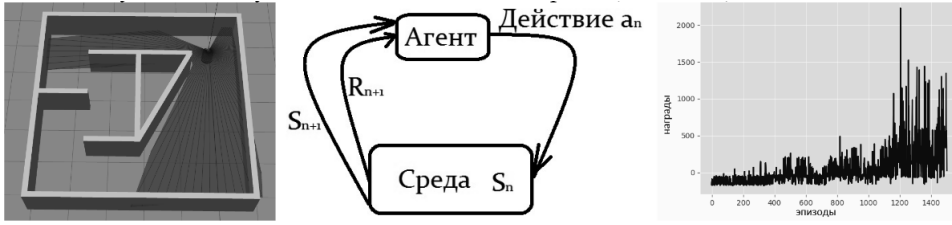


Рис. 2. На левом рисунке изображение робота в лабиринте. Линиями изображен лидар.

Рис 3. На правом рисунке традиционная схема обучения с подкреплением.

Рис 4. График возрастания наград по эпизодам. Высокие отметки с наградой порядка 1200 - соответствуют нескольким полным кругам по лабиринту без столкновений и завершению эпизода по таймауту.

Q-learning, SARSA, и DQN [7, 1, 5], а также на картах разного уровня сложности. Обучался робот в симуляторе Gazebo с использованием ROS.

Под своим состоянием робот понимает набор из  $N$  чисел, которые получаются путем выбора из лидара  $N$  равномерно расставленных лучей и округление их длин. Роботу предстоит основываясь на своем состоянии выбрать одно из 3 действий за каждое из которых своя награда: линейное движение прямо (6 очков), движение вокруг своей оси с небольшой линейной скоростью влево/вправо (1 очко). Такой подход позволил вынудить робота больше двигаться вперед, преодолевать зигзаг, и проходить лабиринт, а не кружиться на месте.

В приведенных методах используется обучение основанное на поиске функции оценки полезности действия через уравнение Беллмана [7].

На Рис. 4 изображены награды по эпизодам. Из графика видно, например, что в первые 200 эпизодов награда почти не становилась положительной, действия робота на тот момент были почти полностью хаотичны, и он очень быстро врезался в стену получая большой штраф (-200 очков).

При обучении использовалась  $\epsilon$ -жадная стратегия. Это значит, что вначале робот действует абсолютно случайным образом, чтобы изучить лабиринт, а далее с каждым эпизодом шанс на случайное действие ( $\epsilon$ ) уменьшается. На 400-600 эпизодах робот уже стал проезжать половину лабиринта, и получать 0-250 очков. А после 1200 стал часто выходить по таймауту, проезжая весь лабиринт.

### 3. Заключение.

Мы изучили лишь несколько вариантов карт, на которых подход с использованием обучения с подкреплением показал себя не хуже классического при более легкой разработке с последующим поддержанием кода и с меньшим набором внешних сенсоров. Однако, этого недостаточно, чтобы утверждать, что мы можем использовать его для широкого класса задач. Необходимо исследовать большее количество карт с разными ограничениями и подобрать наиболее оптимальный подход к решению задачи.

### Список литературы

- [1] Choudhary A., “A Hands-On Introduction to Deep Q-Learning using OpenAI Gym in Python”, 2019.
- [2] Dolgov D., Thrun S., Montemerlo M., Diebel J., “Practical Search Techniques in Path Planning for Autonomous Driving”, *AAAI Workshop - Technical Report*, 2008.
- [3] KumarPanigrahi P., KishoroBisoy S., “Localization strategies for autonomous mobile robots: A review”, *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 2021.
- [4] Sutton R., Barto A., “Reinforcement Learning: An Introduction”, *The MIT Press*, 1998.
- [5] “Reinforcement Learning: Q-Learning vs Sarsa”, <http://www.cse.unsw.edu.au/cs9417ml/RL1/algorithms.html>.
- [6] Ryan De Iaco, Smith S., Czarnecki K., “Learning a Lattice Planner Control Set for Autonomous Vehicles”, 2019, 549–556.
- [7] К.В.Воронцов, “Обучение с подкреплением”, [machinelearning.ru](http://machinelearning.ru).

### Path planning of an autonomous robot in a maze with obstacles

Zalilov E.I., Dolgiy A.S., Shokurov A.V.

We solve the problem of autonomous robot path planning by applying and comparing classical approach and approach using machine learning algorithms. The task was set to "move from point A to point B" on various experimental maps representing a maze with obstacles. We studied the behavior of a two-wheeled robot with different methods of building routes and different sets of sensors. It is assumed that the machine learning approach is easier to develop and requires fewer sensors, so this significantly reduces the cost of such a robot.

**Keywords:** path planning; robotics; motion primitives; reinforcement learning; rl

## References

- [1] Choudhary A., “A Hands-On Introduction to Deep Q-Learning using OpenAI Gym in Python”, 2019.
- [2] Dolgov D., Thrun S., Montemerlo M., Diebel J., “Practical Search Techniques in Path Planning for Autonomous Driving”, *AAAI Workshop - Technical Report*, 2008.
- [3] KumarPanigrahi P., KishoroBisoy S., “Localization strategies for autonomous mobile robots: A review”, *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 2021.
- [4] Sutton R., Barto A., “Reinforcement Learning: An Introduction”, *The MIT Press*, 1998.
- [5] “Reinforcement Learning: Q-Learning vs Sarsa”, <http://www.cse.unsw.edu.au/cs9417ml/RL1/algorithms.html>.
- [6] Ryan De Iaco, Smith S., Czarnecki K., “Learning a Lattice Planner Control Set for Autonomous Vehicles”, 2019, 549–556.
- [7] K.V.Vorontsov, “Reinforcement training” (In Russian), [machinelearning.ru](http://machinelearning.ru).



# Программное обеспечение для регистрации движения глаз

Я. Ю. Миняйло<sup>1</sup>, А. Ю. Комаровский<sup>2</sup>, А. Х. Крымшамхалов<sup>3</sup>

Разработано программное обеспечение для детектирования зрачка на видеозаписи движения глаз. Реализовано два метода: детектирование кругов и детектирование эллипсов. Реализован метод калибровки по размеру радужки.

**Ключевые слова:** видеоокулограф, распознавания положения зрачка, вертикального и горизонтального смещения зрачка, библиотеки компьютерного зрения OpenCV.

## 1. Введение

Изучение реакции глаз в ответ на различные внешние стимулы, такие как движение головы, оптокинетическая стимуляция, гальваническая стимуляция, лежит в основе построения моделей вестибулоокулярного рефлекса [4]. Для отслеживания движений глаз чаще всего используется видеоокулограф [5]. Большинство систем видеоокулографии имеют встроенное программное обеспечение, которое по видеозаписи движения глаз определяет вертикальное, горизонтальное и торсионное вращения глаза. Однако встроенные алгоритмы бывают недостаточно точными.

Работа посвящена созданию программного обеспечения для вычисления вертикального и горизонтального смещения зрачка глаза. Торсионное вращение глаза – вращение вокруг зрительной оси, в данной работе не учитывается.

## 2. Основные понятия и формулировка результата

Способ детектирования изменения положения зрачка основан на анализе изображения глаза с помощью библиотеки компьютерного зрения

---

<sup>1</sup>Миняйло Яна Юрьевна — аспирантка факультета космических исследований МГУ им. Ломоносова, e-mail: minyailo\_yana@mail.ru.

Minyaylo Yana Yurevna — graduate student, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Space Research.

<sup>2</sup>Комаровский Александр Юрьевич — студент 4 курса факультета космических исследований МГУ имени М. В. Ломоносова, e-mail: alexfeed1407@gmail.com.

Komarovskiy Aleksandr Yurevich — forth year student, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Space Research.

<sup>3</sup>Крымшамхалов Ахмат Хамзатович — студент 4 курса факультета космических исследований МГУ имени М. В. Ломоносова, e-mail: akhmatkrym@gmail.com.

Krymshamkhalov Akhmat Khamzatovich — forth year student, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Space Research.

OpenCV. Видеоизображение, получаемое с камеры окулографа, передается на компьютер, где отображается графически, сохраняется и анализируется.

Для распознавания положения зрачка глаза на каждом кадре видеоряда используются методы библиотеки компьютерного зрения OpenCV [2, 6]. Зрачок человека в норме круглый, и для его распознавания применяется градиентный метод Хафа (Hough gradient method). Первым шагом детектирования является обнаружение границ объектов на изображении. Оператор Собеля дает оценку амплитуды и направления вектора градиента в каждой точке. Путем движения в направлении вектора градиента определяется усредненное положение центра. Путем варьирования вдоль третьего параметра (радиуса окружности) определяется значение радиуса. Для минимизации ошибки определения координат центра круга и его радиуса при анализе изображения. Также для уменьшения ложного детектирования круглых объектов производится настройка яркости и контрастности изображения. В норме, глаз человека может поворачиваться на достаточно большие углы. Из-за чего иногда круглый зрачок проецируется на плоскость матрицы камеры как эллипс. Исходя из этого была выбрана функция поиска контуров на изображении (`findContours`), а затем функция `fitEllipse`, которая позволяет детектировать эллипсы [3]. По полученным координатам центра зрачка, строятся графики изменения положения зрачка относительно первоначального положения. Для сглаживания графиков движения зрачка используется фильтр Калмана, позволяющий фильтровать ошибки, возникающие из-за возможной неточности нахождения центра зрачка [1].

Для пересчета получаемых координат глаза в угол поворота в программном обеспечении реализована ручная калибровка диаметра радужки [4]. Диаметр радужки неизменен и равен 12 миллиметров. Отмечая на первом кадре вручную границы радужки, мы можем пересчитать пиксели изображения в миллиметры. А затем смещения по вертикали и горизонтали из миллиметров в градусы, считая радиус глазного яблока постоянным.

В результате проделанной работы создано программное обеспечение, которое на данном этапе позволяет определять угол поворота глаза в вертикальной и горизонтальной плоскости.

## Список литературы

- [1] Andrews A., Mohinder S. Grewal, “Kalman Filtering: Theory and Applications”, 1985, 600.
- [2] Bradski G., Kaehler A., “Learning OpenCV 3: Computer Vision in C++ with the OpenCV Library”, *O’Reilly Media*, 2017, 1024.

- [3] Ilingworth J., Kittler J., Yuen H., “Ellipse detection using the Hough transform”, 1988, 265.
- [4] Kaspransky R.R., Kruchinina A.P., Minyaylo Y.Y., “Model of the extraocular muscles control by information from vestibular system”, *Biomechanics 2020 International Conference of the Polish Society of Biomechaniks*, 2021, 82-83.
- [5] Барабанщиков В. А., Жегалло, А. В., “Методы регистрации движений глаз: теория и практика”, *Электронный журнал «Психологическая наука и образование»*, **5** (2010), 241-251.
- [6] *Документация к библиотеке компьютерного зрения OpenCV: официальный сайт.*, 2021

### **CSoftware for registering eye movement**

**Minyaylo Y. Y., Komarovskiy A. Y., Krymshamkhalov A. K.**

Software for the pupil detection on the video recording of eye movement has been developed. Two methods are implemented: circle detection and ellipse detection. The method of calibration by the size of the iris is implemented.

*Keywords:* video oculograph, recognition of pupil position, vertical and horizontal pupil displacement, OpenCV computer vision libraries.

## **References**

- [1] Andrews A., Mohinder S. Grewal, “Kalman Filtering: Theory and Applications”, 1985, 600
- [2] Bradski G., Kaehler A., “Learning OpenCV 3: Computer Vision in C++ with the OpenCV Library”, *O’Reilly Media*, 2017, 1024
- [3] Ilingworth J., Kittler J., Yuen H., “Ellipse detection using the Hough transform”, 1988, 265
- [4] Kaspransky R.R., Kruchinina A.P., Minyaylo Y.Y., “Model of the extraocular muscles control by information from vestibular system”, *Biomechanics 2020 International Conference of the Polish Society of Biomechaniks*, 2021, 82-83
- [5] Barabanshchikov V. A., Zhegallo, A.V., “Methods of registering eye movements: theory and practice”, *Electronic journal "Psychological science and education"*, **5** (2010), 241-251 (In Russian)
- [6] *Documentation for the OpenCV Computer vision library: official website.*, 2021 (In Russian)

# Применение окулографии для объективной оценки воспроизведения акселерационных эффектов тренажёрными устройствами имитации полёта

П. Ю. Сухочев<sup>1</sup> Я. Ю. Миняйло<sup>2</sup>

В работе рассмотрены существующие методы оценки качества имитации системой подвижности авиатренажёров акселерационных воздействий, возникающих в полёте. Предложена технология, основанная на модели вестибуло-окулярного рефлекса, позволяющая при помощи современных технических средств производить объективное сравнение вестибулярного отклика на акселерационные воздействия, возникающие в реальном полёте, с их имитацией на комплексных авиационных тренажёрах. Предложено применение указанной технологии для валидации и совершенствования имитационных систем, применяемых для подготовки пилотов к выводу из сложного пространственного положения.

**Ключевые слова:** вестибуло-окулярный рефлекс, объективная оценка качества тренажёрных устройств имитации полёта, безопасность полётов.

По статистике, опубликованной в отчёте IATA (англ. International Air Transport Association, Международная ассоциация воздушного транспорта) за 2008-2017 годы [10], более 80% человек погибло в катастрофах, классифицированных как CFIT (англ. Controlled Flight Into Terrain, Столкновение в управляемом полёте с поверхностью Земли или объектами, расположенными на её поверхности) и LOC-I (англ. Lost of Control / In-flight — потеря управления в полёте). Согласно терминологии, изложенной в справочнике по категориям авиационных событий [4], к авиационным происшествиям обоих типов приводят в основном ошибочные действия экипажа. Причём, на долю CFIT в период с 1990 года приходится более 20% всех авиакатастроф, а в 1994, 1995 и 2014 году - более

---

<sup>1</sup> Сухочев Павел Юрьевич — научный сотрудник лаб. математического обеспечения имитационных динамических систем мех.-мат. ф-та МГУ имени М.В.Ломоносова, e-mail: ps@moids.ru.

Sukhochev Pavel Yurievich — researcher, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Mechanics and Mathematics, Laboratory of Simulation Dynamical Systems Software.

<sup>2</sup> Миняйло Яна Юрьевна — аспирант факультета космических исследований МГУ имени М.В.Ломоносова, e-mail: minyailo\_yana@mail.ru.

Minyailo Yana Yurievna — graduate student, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Space Research.

50% [11]. Анализ записей переговоров и действий экипажей показал, что к ошибкам приводит в основном неверное понимание пилотом положения летательного аппарата в пространстве в условиях сложной визуальной обстановки. При этом, пилот без сомнений однозначно воспринимает привычные сигналы своего вестибулярного аппарата других механорецепторов, не редко игнорируя (катастрофа Piper PA-32R-301 N9253N близ Мартас-Виньярда, 16.07.1999) или не имея возможности распознать (катастрофа F-15A 75-0040 в Арч Кейп, 26.06.2007) под действием вибраций и перегрузок верные показания приборов. Также механические стимулы, соответствующие ожидаемой реакции летательного аппарата в ответ на воздействие на органы управления, подкрепляют ошибочное представление пилота о положении летательного аппарата в пространстве. С момента поступления первых комплексных тренажёрных устройств в авиационные учебные заведения, оценка адекватности имитации полёта производилась тест-пилотами по шкале Купера-Харпера. Настройка системы подвижности до недавнего времени производилась так же. Только в 2009 году в третьем издании руководящего документа по квалификационной оценке тренажёрных устройств имитации полёта [6] появился объективный метод оценки систем подвижности (англ. OMCT, Objective Motion Cueing Tests, Объективное испытание системы подвижности). Общй принцип работы этой системы заключается в подаче на вход системы подвижности набора сигналов разной частоты и оценке сдвига фазы и затухания амплитуды её исполнительных механизмов. Эта система позволяет объективно оценить технический уровень системы подвижности, но до сих пор не реализованы объективные методики оценки качества имитации акселерационных воздействий на органы восприятия пилота и корректности самих алгоритмов имитации. Алгоритмы формирования акселерационных воздействий при помощи системы подвижности современного комплексного устройства имитации полёта разделяют движение при помощи частотного фильтра на две части [8] с границей, находящейся в интервале между быстрым (до 1 рад/с для вращательного и до 0,5 рад/с для поступательного движений) и медленным (более 4 рад/с для вращательного и более 2 рад/с для поступательного движений). Быстрое движение оказывает наибольшее влияние на выполнение задачи по сенсомоторному управлению летательным аппаратом [9] и воспроизводится максимально точно в пределах механических ограничений системы подвижности, с целью обучения пилота по стабилизации ЛА при воздействии внешних возмущений. Медленные движения имитируются менее точно – так как на земле невозможно воспроизвести траекторию движения воздушного судна. При этом, по заявлению пилотов, сравнивающих ощущения в полёте с ощущениями на пилотажном стенде, обычные условия полёта в целом похожи, но при возник-

новении нештатных ситуаций (переход системы управления из Normal mode в Direct mode) и ухудшении условий пилотирования (сложные метеоусловия, сложное пространственное положение), отработанных в процессе обучения на тренажёрных устройствах имитации полёта, замечены многочисленные отличия в ощущениях, а навыки, полученные на этих устройствах, оказываются ложными. Так произошло 5 мая 2019 года с самолётом Sukhoi Superjet 100-95B [5]. При изучении методик сертификации тренажёрного устройства SSJ100 производства L3 Commercial Training Solutions, не было найдено иных объективных систем оценок качества имитации акселерационного воздействия кроме тестов системы подвижности на соответствие амплитудно-частотных характеристик систем техническим требованиям, указанным в руководящем документе о методах квалификационной оценки тренажёрных устройств имитации полёта [6]. В качестве нового подхода к объективной оценке качества имитации акселерационного воздействия предлагается произвести сравнение глазодвигательных реакций пилота при выполнении полёта по одинаковым траекториям на реальном самолёте и на тренажёрном устройстве. В ответ на стимуляцию вестибулярного аппарата у человека возникает вестибуло-окулярный нистагм - серия произвольных ритмичных содружественных движений глаз. Различают две фазы нистагма: медленное отклонение глаза в одном направлении (медленная фаза) и сменяющий его быстрый возвратный скачок (быстрая фаза). Амплитуда и время обеих фаз зависят от величин и направлений угловых и линейных ускорений головы. В работе [1] описана статистическая модель вестибулярного нистагма, вырабатывающая её модельные траектории и имеющие статистические характеристики, соответствующие наблюдаемым в эксперименте. Математическая модель представляет собой зависимости относительного угла поворота глаза и амплитуды медленной и быстрой фаз нистагма от поворота головы. Предлагается оценивать качество имитации полёта, сравнивая параметры нистагма, возникающего в реальном полёте и параметры нистагма во время имитации того же полёта на тренажёрном устройстве. Для отслеживания нистагма во время полёта предлагается использовать метод видеоокулографии, так как это неинвазивный, простой и безопасный метод отслеживания движения глаз. Видеоокулография на тренажёрных устройствах применяется для оценки работы экипажа [2]. При сравнении данных, полученных при помощи окулографа Otometrics ICS Impulse USB при проведении экспериментов на имитационных стендах, оборудованных системой подвижности [3] и в полётах по программе экспериментов в рамках НЦМУ "Сверхзвук" [7] обнаружена идентичность саккад при выполнении наклона до  $27^\circ$  по углу крена с угловым ускорением до  $0,084 \text{ рад/с}^2$  для перехода от горизонтального полёта к координированному развороту (инди-

катор скольжения находится в нейтральном положении), но изменение характера саккад при выполнении самого разворота в реальном полёте и практически полное их отсутствие при имитации этого разворота на стенде. Так как сбор данных об акселерационном воздействии на экипаж при моделировании сложных и аварийных ситуаций на пассажирском авиалайнере связан с высоким риском повреждения воздушного судна, для обеспечения безопасности сбор данных производится на борту пилотажных самолётов с максимально точным воспроизведением траектории движения маломаневренного самолёта при сохранении значительного запаса по параметрам управляемости и высоты для вывода. Проведённое исследование показывает возможность создания системы объективной оценки средств имитации, основываясь на модели глазодвигательного отклика на стимуляцию вестибулярного аппарата и применении современных технических средств его измерения.

## Список литературы

- [1] Боков Т.Ю., Сучалкина А.Ф., Якушева Е.В., Якушев А.Г., "Математическое моделирование вестибулярного нистагма. Часть I. Статистическая модель", *Российский журнал биомеханики* (2014), **18**:1, 48–64
- [2] Куравский Л.С., Юрьев Г.А., Златомрежев В.И., Грешников И.И., Поляков Б.Ю., "Оценка действий экипажа самолёта по данным видеоокулографии", *Экспериментальная психология* (2021) **14**:1, 204–222.
- [3] Садовничий В.А., Александров В.В., Александрова О.В., Вега Р., Коноваленко И.С., Сото Э., Тихонова К.В., Гордильо-Домингез Х.Л., Гонзалес О., "О гальванической коррекции вестибулярной активности пилота при визуальном управлении полетом", *Вестник Московского университета. Серия 1. Математика. Механика.* (2019) **1**:1, 34–41.
- [4] "Категории Авиационных Событий. Определения и порядок использования при формировании архива материалов расследования авиационных инцидентов и производственных происшествий с гражданскими воздушными судами Российской Федерации", *Федеральное агентство воздушного транспорта. Управление инспекции по безопасности полетов* (2016)
- [5] "Предварительный отчёт МАК", URL: [https://mak-iac.org/upload/iblock/4e4/report\\_ra-89098\\_pr.pdf](https://mak-iac.org/upload/iblock/4e4/report_ra-89098_pr.pdf) (дата обращения: 23.01.2022).
- [6] "Руководство по критериям квалификационной оценки тренажерных устройств имитации полета. Том I. Самолеты", *Международная организация гражданской авиации* (2015)
- [7] Prud V., Mukhamedov A., Sleptsov E., Andrianova O., Chertopolokhov V., Chairez I., "Non-Parametric Spiking Neural Network Modelling of the Eye-Movement Response to Enforced Controlled Accelerations", *IFAC-PapersOnLine* (2021), **54**:13, 311–316
- [8] White A., Rodchenko V., "Motion fidelity criteria based on human perception and performance", *American Institute of Aeronautics and Astronautics* 99–4330, (1999)

- [9] Zaichik L.E., Yashin Yu.P., Desyatnik P.A., "Peculiarities of motion cueing for precision control tasks and maneuvers", *27 International Congress of the Aeronautical Science* (2000).
- [10] "IATA Controlled Flight Into Terrain Accident Analysis Report 2018 Edition", *International Air Transport Association* (2018) ISBN is 978-92-9229-717-6
- [11] "The Aviation Safety Network. Loss of situational awareness", URL: <https://aviation-safety.net/database/events/dblist.php?Event=FCV?> (дата обращения 11.11.2021).

## **The application of the oculography for the flight simulation training devices acceleration effects objective evaluation**

**P. Yu. Sukhochev, Ya. Yu. Minyailo**

The existing methods for evaluation the quality of the acceleration effects imitated by the motion cueing system of flight simulation training devices are considered. The technology based on the model of the vestibulo-ocular reflex is proposed. It may allow to apply the modern technical equipment to reach the objective comparison of the vestibular response to acceleration effects in a real flight and the simulation. This technology could enhance the simulation systems and it's validation for improve the upset prevention and recovery training.

*Keywords:* vestibulo-ocular reflex, flight simulators objective quality evaluation, flight safety.

## **References**

- [1] Bokov T.Yu., Suchalkina A.F., Yakusheva E.V., Yakushev A.G., "Mathematical modeling of vestibular nystagmus. Part I. Statistical model" , *Russian Journal of Biomechanics* (2014), **18**:1, 48–64
- [2] Kuravsky L.S., Yuriev G.A., Zlatomrezhev V.I., Greshnikov I.I., Polyakov B.Yu., "Assessing the aircraft crew activity basing on video oculography data", *Experimental psychology* (2021) **14**:1, 204–222.
- [3] Sadovnichii V.A., Aleksandrov V.V., O. V. Aleksandrova, R. Vega, I. S. Konovalenko, Soto E., Tikhonova K.V., Gordillo-Dominguez J.L., and Gonzalez Petlascalco O., "Galvanic correction of pilot's vestibular activity during visual flight control", *Bulletin of the Moscow University. Series 1. Mathematics. Mechanics.* (2019) **1**:1, 34–41.
- [4] "Categories of Aviation Events. Definitions and procedure for use in the formation of an archive of materials from the investigation of aviation incidents and industrial accidents with civil aircraft of the Russian Federation", *Federal Air Transport Agency. Safety Inspection Office* (2016)
- [5] "IAC preliminary report", URL: [https://mak-iac.org/upload/iblock/4e4/report\\_ra-89098\\_pr.pdf](https://mak-iac.org/upload/iblock/4e4/report_ra-89098_pr.pdf) (date of application: 23.01.2022).
- [6] "Manual of Criteria for the Qualification of Flight Simulation Training Devices. Volume I. Aeroplanes", *International Civil Aviation Organization* (2015)



- [7] Prud V., Mukhamedov A., Sleptsov E., Andrianova O., Chertopolokhov V., Chairez I., "Non-Parametric Spiking Neural Network Modelling of the Eye-Movement Response to Enforced Controlled Accelerations", *IFAC-PapersOnLine* (2021), **54**:13, 311–316
- [8] White A., Rodchenko V., "Motion fidelity criteria based on human perception and performance", *American Institute of Aeronautics and Astronautics* 99–4330, (1999)
- [9] Zaichik L.E., Yashin Yu.P., Desyatnik P.A., "Peculiarities of motion cueing for precision control tasks and maneuvers", *27 International Congress of the Aeronautical Science* (2000).
- [10] "IATA Controlled Flight Into Terrain Accident Analysis Report 2018 Edition", *International Air Transport Association* (2018) ISBN is 978-92-9229-717-6
- [11] "The Aviation Safety Network. Loss of situational awareness", URL: <https://aviation-safety.net/database/events/dblist.php?Event=FCV?> (date of application 11.11.2021).

# Адаптация технологии отслеживания движений человека для создания аватара внутри интерактивной виртуальной среды

В. В. Черданцева<sup>1</sup>, Г. С. Бугрий<sup>2</sup>, С. В. Леонов<sup>3</sup>,  
И. С. Поликанова<sup>4</sup>, А. А. Якушина<sup>5</sup>, В. А. Чертополохов<sup>6</sup>

Данное исследование посвящено вопросу формирования движений аватара в виртуальном пространстве, а также разработке предложений по модификации алгоритмов отслеживания движений конечностей человека в целях создания интерактивной виртуальной среды. Представленные предложения позволяют успешнее фильтровать данные трекинга и прогнозировать движение точек крепления отслеживающих датчиков, а, соответственно, и аватара в виртуальном пространстве.

**Ключевые слова:** инерциальное отслеживание тела, оптическое отслеживание тела, виртуальная реальность, VR, алгоритмы отслеживания

---

<sup>1</sup> *Черданцева Валерия Владимировна* — аспирант ФКИ МГУ, e-mail: cherdantzeva.v@yandex.ru.

Cherdanceva Valeriya Vladimirovna — postgraduate student, Faculty of Space Research, Lomonosov Moscow State University

<sup>2</sup> *Бугрий Григорий Степанович* — м.н.с. лаборатории МОИДС мех.-мат. ф-та МГУ, e-mail: gregbugr@vrmsu.ru.

Bugriy Grigoriy Stepanovich — junior researcher, MOIDS Laboratory, Faculty of Mechanics and Mathematics, Lomonosov Moscow State University

<sup>3</sup> *Леонов Сергей Владимирович* — доцент факультета психологии МГУ, e-mail: svleonov@gmail.com.

Leonov Sergey Vladimirovich — associate professor, Faculty of Psychology, Lomonosov Moscow State University

<sup>4</sup> *Поликанова Ирина Сергеевна* — ст.н.с. факультета психологии МГУ, e-mail: irinapolikanova@mail.ru.

Polikanova Iriya Sergeevna — senior researcher, Faculty of Psychology, Lomonosov Moscow State University

<sup>5</sup> *Якушина Анастасия Александровна* — аспирант факультета психологии МГУ, e-mail: anastasiushka96@yandex.ru.

Yakushina Anastasia Alexandrovna — postgraduate student, Faculty of Psychology, Lomonosov Moscow State University

<sup>6</sup> *Чертополохов Виктор Александрович* — н.с. лаборатории МОИДС мех.-мат. ф-та МГУ, e-mail: psvr@vrmsu.ru.

Chertopolokhov Victor Alexandrovich — researcher, MOIDS Laboratory, Faculty of Mechanics and Mathematics, Lomonosov Moscow State University

# 1. Введение

Формирование движение аватара в виртуальном пространстве происходит в несколько этапов [1]. Первым этапом является процесс подготовки аватара к анимации, который называется риггингом. Риггинг включает в себя создание и размещение внутри трёхмерной модели рига, виртуального “скелета” — набора “костей” и “суставов” (bones, joints), установления иерархической зависимости между ними и значений возможных трансформаций для каждой из этих “костей” [2]. С помощью входных данных из реального пространства можно определить положение и ориентацию каждой кости. После этого данную информацию требуется применить к трехмерной модели. Посредством риггинга можно добиться сообщения деформаций модели. Модель представляет собой полигональную сетку, которой определяется форма самой модели. У каждой вершины сетки назначен собственный вес, характеризующий влияние положения каждой кости и сустава (рис. 1), рига на ее положение.

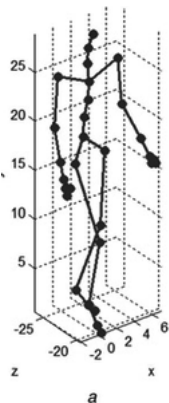


Рис. 1. Пример виртуального скелета

В общем случае положение любого объекта в системах виртуальной реальности определяется тремя координатами в прямоугольной системе координат и кватернионом  $\mathbf{q}$ , определяющим ориентацию в пространстве. Положение датчиков, закрепленных на руках и ногах человека, может быть выражено в замкнутой форме по совместным значениям  $\mathbf{q}$  с использованием так называемой прямой кинематической модели:

$$X = FKM(\mathbf{q}, \xi), \quad (1)$$

где  $\xi$  — набор кинематических параметров (длины костей и пр.). Фактическое выражение этого отношения может изменяться в соответствии с представлением, которое выбрано для точки датчика  $X$ .

Таким образом, состояние виртуального аватара в виртуальной среде является суммой векторов положений звеньев. Решение задачи корректного отображения аватара сводится к решению обратной кинематической задачи и определению неизвестных параметров костей. Решение обратной задачи кинематики не является однозначным для многозвенников, что приводит к необходимости увеличения количества применяемых датчиков.

## 2. Модификация алгоритмов фильтрации для отслеживания движений человека

Корректность восприятия виртуальной реальности критически зависит от синхронизации воспроизводимой имитации и реальных действий человека. Чтобы позволить пользователю корректно воспринимать и взаимодействовать с виртуальными объектами в реальном времени, требуется получать актуальную информацию о положении его головы и конечностей [3].

Однако между реальным движением и его отображением в виртуальном пространстве существует задержка, которая складывается из времени на получение и обработку данных с системы видеоанализа, их передачи на графическую станцию, рендеринга и вывода на экране итогового изображения [4]. Чтобы уменьшить эффект задержки, требуется прогнозировать движение конечностей человека. Для прогноза эффективно использовать данные с инерциальных датчиков угловой скорости (гироскопов), частота работы обычно более чем в 5 раз превышает частоту работы оптического трекинга. В качестве метода фильтрации использовался модифицированный фильтр Маджвика [5].

Модификация фильтра заключается в замене магнитный показаний Земли полем постоянного магнита, также предложена модель магнитного диполя, дающая ориентацию объекта в пространстве. Качество фильтрации было оценено по отклонению от моделей реального движения, получаемых по видеофиксации углов наклона кости (по временному ряду) и по оптической системе с инфракрасными датчиками для шарнирной системы, рассчитаны среднеквадратические ошибки измерений.

В ходе экспериментов отслеживание движений производились на шарнирной системе с закрепленным на подвижном основании постоянным магнитом и движущейся платой. Была определена взаимная локализация магнита и платы с помощью оптической системы, а по показаниям магнитометров была найдена ориентация магнитного диполя, что позволило сделать пересчет магнитных измерений. Движения выполнялись в разных режимах (плоскопараллельные, колебательные, враща-

тельные), полученные результаты были сравнены с эталонными движениями, фиксируемыми по инфракрасным датчикам. Анализ результатов приведен в таблице 1. Приводятся средняя абсолютная ошибка (Mean Absolute Error, MAE) и средняя квадратичная ошибка (Root Mean Square Error, RMSE).

Датчики\Ошибки	MAE	RMSE
Гироскопы	12.85°	16.38°
Фильтр Маджвика	12.28°	15.89°
Фильтр модифицированный	2.46°	3.18°

Таблица 1. Оценка ошибок ориентации, полученная при расчете показателей датчиков и применении фильтра без и с модификацией.

### 3. Заключение

Экспериментальная проверка показала улучшение отслеживания движений при использовании предложенной модификации фильтра по сравнению с применением датчиков угловой скорости без коррекции. В дальнейшем подобный подход позволит улучшить фильтрацию данных трекинга, прогнозировать движение точек крепления датчиков трекинга и, соответственно, виртуального аватара спортсмена.

Исследование проводится при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 19-78-10134.

### Список литературы

- [1] Кручинина А. П., Латонов В. В., Чертополохов В. А., “Обзор технологий визуальной имитации в тренажерных системах”, *Пилотируемые полеты в космос*, 2019, № 3(32), 89–107.
- [2] Avril Q., Ghafourzadeh D., Ramachandran S., Fallahdoust S., Ribet S., Dionne O., de Lasa M., Paquette E., “Animation Setup Transfer for 3D Characters”, *Computer Graphics Forum*, **35:2** (2016), 115–126.
- [3] Зинченко Ю. П., Меньшикова Г. Я., Баяковский Ю. М., Черноризов А. М., Войскунский А. Е., “Технологии виртуальной реальности: методологические аспекты, достижения и перспективы”, *Национальный психологический журнал*, 2010, № 1(3), 54–62.
- [4] Yang Y., Zhang L., Yan S., and Ning L., “Low-cost, high-performance VR delay detection device based on PIN photodiode”, *Optoelectronic Devices and Integration VIII*, SPIE, 2019, 30.
- [5] Madgwick S., “An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays”, *Report x-io and University of Bristol (UK)*, **25**, 2010, 113–118.

# Adaptation of Motion Capture Technology to Record a Person's Movements to Create an Avatar Inside the Interactive Virtual Environment

Cherdanceva V.V., Bugriy G.S., Leonov S.V., Polikanova I.S.,  
Yakushina A.A., Chertopolokhov V.A.

This study is devoted to the problem of forming the movements of an avatar in a virtual environment and developing proposals for modifying the tracking algorithms to create an interactive virtual environment. The presented proposals will allow filtering the tracking data more successfully and predicting the motion of the attachment points of the tracking sensors and, consequently, of the avatar in the virtual environment.

**Keywords:** inertial body tracking, optical body tracking, virtual reality, VR, tracking algorithms

## References

- [1] Kruchinina A.P., Latonov V.V., Chertopolokhov V.A., “Review of Visual Imitation Technologies in Simulation Systems”, *MANNED SPACEFLIGHT*, 2019, № 3(32), 89–107 (In Russian).
- [2] Avril Q., Ghafourzadeh D., Ramachandran S., Fallahdoust S., Ribet S., Dionne O., de Lasa M., Paquette E., “Animation Setup Transfer for 3D Characters”, *Computer Graphics Forum*, **35**:2 (2016), 115–126.
- [3] Zinchenko Yu.P., Menshikova G.Ya., Bayakovskii Yu.M., Chernorizov A.M., Voiskunsky A.E., “Virtual reality technology in the context of world and national psychology: methodological aspects, achievements and prospects”, *National Psychological Journal*, 2010, № 1(3), 54–62 (In Russian).
- [4] Yang Y., Zhang L., Yan S., and Ning L., “Low-cost, high-performance VR delay detection device based on PIN photodiode”, *Optoelectronic Devices and Integration VIII*, SPIE, 2019, 30.
- [5] Madgwick S., “An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays”, *Report x-io and University of Bristol (UK)*, **25**, 2010, 113–118.

## Часть 7.

# Нейроморфный искусственный интеллект и когнитивные системы

# Исследование кратковременной и долговременной памяти в задаче распознавания положения объектов у мышей

В. И. Алипов<sup>1</sup>, К. А. Торопова<sup>2</sup>, О. И. Ивашкина<sup>3</sup>, К. В. Анохин<sup>4</sup>

Исследование декларативной памяти является актуальным направлением нейрофизиологии. В настоящей работе проверялась возможность формирования кратковременной и долговременной памяти у лабораторных мышей в задаче распознавания нового положения объектов. В дальнейшем была проверена возможность нарушения формирования долговременной памяти на положение объектов путем блокирования рецепторов глутамата во время обучения. Полученные результаты свидетельствуют о возможности сформировать оба вида декларативной памяти с использованием этой методики, а также о важной роли глутаматергической системы в формировании долговременной декларативной памяти.

**Ключевые слова:** декларативная память, распознавание положения объектов, кратковременная память, долговременная память.

## 1. Введение

В изучении механизмов формирования и хранения воспоминаний отдельный интерес представляет декларативная память, в частности потому, что её нарушение является основным проявлением многих нейродегенеративных заболеваний [1]. Моделирование различных форм памяти и их

---

<sup>1</sup> *Алипов Владимир Иванович* — аспирант Института высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, e-mail: alipvladimir@yandex.ru.

*Alipov Vladimir Ivanovich* — graduate student, Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of RAS.

<sup>2</sup> *Торопова Ксения Александровна* — младший научный сотрудник института перспективных исследований мозга МГУ, e-mail: xen.alexander@gmail.com.

*Toropova Ksenia Aleksandrovna* — junior research associate, Advanced brain research institute, Moscow State University.

<sup>3</sup> *Ивашкина Ольга Игоревна* — младший научный сотрудник института перспективных исследований мозга МГУ, e-mail: oivashkina@gmail.com.

*Ivashkina Olga Igorevna* — junior research associate, Advanced brain research institute, Moscow State University.

<sup>4</sup> *Анохин Константин Владимирович* — директор института перспективных исследований мозга МГУ, e-mail: k.anokhin@gmail.com.

*Anokhin Konstantin Vladimirovich* — Prof., Advanced brain research institute, Moscow State University.



нарушений на лабораторных животных обладает рядом преимуществ перед исследованиями с участием людей-добровольцев, включая возможность в полной мере контролировать условия эксперимента, а также выполнять широкий спектр манипуляций, в том числе применять методы генной инженерии. Для оценки параметров декларативной памяти у человека можно использовать широкий спектр опросников и когнитивных тестов, на животных же для этого используют поведенческие тесты. Одним из вариантов оценки декларативной памяти у лабораторных животных являются тесты на распознавание новых объектов (РНО) или на распознавание нового положения объектов (РПО) у грызунов [2, 3]. Методика заключается в помещении животного в знакомую ранее арену с двумя или более новыми объектами в сеансе обучения, а в сеансе тестирования – в замене одного объекта незнакомым (в РНО) или перемещении одного из объектов в новое положение (в РПО). Предполагается, что если животное при обучении запомнило объекты и их положение, то во время тестирования оно больше времени будет проводить, обследуя перемещенный или новый объект, поскольку измененный объект будет обладать большей новизной для животного. Отдельным преимуществом данной методики является отсутствие положительного или отрицательного подкрепления, что приближает память, формирующуюся в данной задаче, к декларативной памяти у человека. В настоящее время данные тесты используются для различных модельных животных, начиная от рыб, заканчивая приматами [4].

Целью данной работы является проверка возможности формирования памяти у мышей в парадигме РПО, а также возможности нарушения консолидации памяти за счет блокирования глутаматергической системы мозга. Для этого нами в независимых экспериментах проводилась оценка способности мышей сформировать кратковременную память (КВП) (сохраняется в течение нескольких часов после обучения) и долговременную память (ДВП) (сохраняется в течение не менее чем 24 часов после обучения), а также оценка способности мышей формировать ДВП на фоне введения блокатора глутаматных рецепторов.

## 2. Материалы и методы

В первой части эксперимента участвовали 23 самца мышей линии C57Bl/6, которых разделили на две группы: животные, у которых тестировали КВП ( $N = 14$ ), и мыши, у которых тестировали ДВП ( $N = 9$ ). Обе группы проходили три этапа обучения в парадигме РПО. Первый этап заключался в предобучении: животных для ознакомления помещали на 6 мин в пустую прямоугольную арену (33 x 40 см) со зрительными ориентирами на стенках. Через 24 часа при обучении животных

возвращали в ту же арену на 15 мин, при этом в арене находились два новых объекта, которые представляли из себя деревянные арки, одна из которых была красного, другая зеленого цвета. Тестирование памяти проводили через 2 или 24 часа для групп КВП и ДВП соответственно. Тестирование проходило в той же арене с теми же объектами, но один из них был перемещен в новое положение. Во второй части эксперимента участвовали 24 самца мышей линии C57Bl/6, которые проходили обучение в парадигме РПО по методике формирования ДВП, описанной выше. Мыши были разделены на три группы: контрольную, получившую инъекцию физиологического раствора ( $N = 8$ ), группу, получившую антагонист глутаматных рецепторов МК-801 в дозе 0,15 мг/кг ( $N = 8$ ) и группу, получившую МК-801 в дозе 0,3 мг/кг ( $N = 8$ ). Все растворы вводились интраперитонеально в расчете 0,1 мл на 10 г веса мыши.

Видеорегистрацию и анализ поведения осуществляли в программе EthoVision XT 8.0 (Noldus). Для оценки обследования объектов регистрировали время, проведенное носом мыши в области рядом с объектом (3 см от краев объекта). Для этого автоматически выделяли точку, соответствующую кончику носа, на видеозаписи. Далее рассчитывали коэффициент предпочтения (КП) перемещенного объекта как меру памяти как отношение времени у перемещенного объекта к общему времени возле объектов. Полученные КП для этапа обучения и этапа тестирования сравнивали с помощью парного критерия Стьюдента. Кроме того, был проведен дисперсионный анализ КП трех групп второго этапа эксперимента в момент обучения и отдельно в момент тестирования. Для статистической обработки использовалось программное обеспечение GraphPad Prism.

### 3. Результаты

При тестировании кратковременной памяти нами был получен значительно более высокий уровень предпочтения перемещенного объекта в тесте по сравнению с обучением ( $p = 0,0026$ ). При тестировании долговременной памяти нами также было показано значимое предпочтение перемещенного объекта по сравнению с сессией обучения ( $p = 0,016$ ) (рис. 1).

При тестировании ДВП у мышей из второго этапа эксперимента, получавших инъекцию физиологического раствора было показано значимое предпочтение перемещенного объекта по сравнению с сессией обучения ( $p = 0,0023$ ).

При тестировании ДВП у мышей, получавших инъекцию МК-801 в дозировке 0,15 мг/кг, не было обнаружено значимого предпочтения перемещенного объекта по сравнению с сессией обучения ( $p = 0,1005$ ).

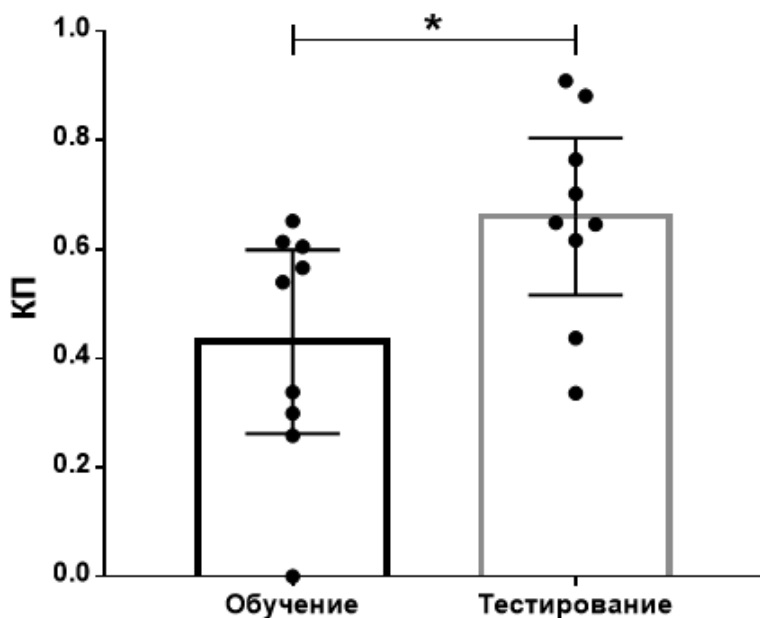


Рис. 1. Сравнение коэффициента предпочтения перемещенного объекта при обучении и тестировании долговременной памяти через 24 часа. \* –  $p < 0,05$ , парный критерий Стьюдента.

При тестировании ДВП у мышей, получавших инъекцию МК-801 в дозировке 0,3 мг/кг, также не было обнаружено значимого предпочтения перемещенного объекта по сравнению с сессией обучения ( $p = 0,9499$ ) (рис. 2).

Сравнение КП перемещенного объекта в сессии тестирования во всех трех группах второго этапа эксперимента показало значимые различия обеих групп, получавших МК-801, от контрольной группы, тогда как в сессию обучения значимого различия между группами не было.

#### 4. Заключение

Полученные результаты свидетельствуют о том, что методика РПО позволяет формировать как кратковременную, так и долговременную память у лабораторных мышей. Кроме того, получены свидетельства важной роли глутаматергической системы мозга в консолидации ДВП.

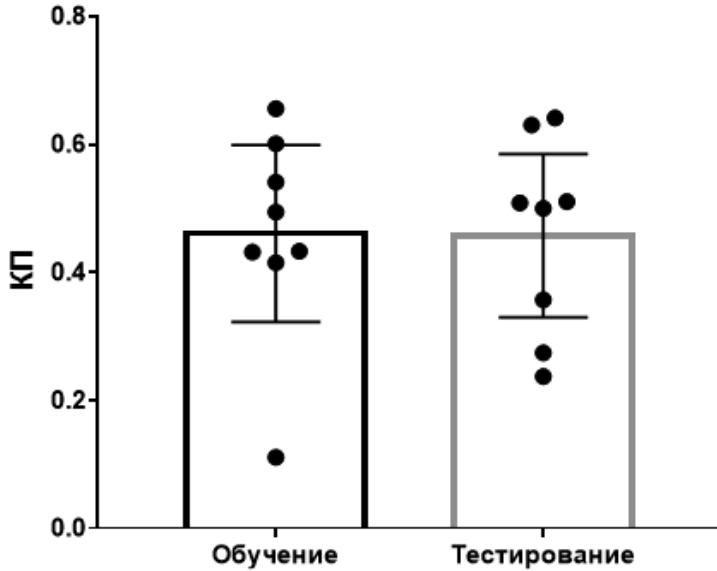


Рис. 2. Сравнение коэффициента предпочтения перемещенного объекта при обучении и тестировании долговременной памяти через 24 часа при интраперитонеальном введении МК-801 в дозировке 0,3 мг/кг.

Исследование выполнено при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Мозг, когнитивные системы, искусственный интеллект».

## Список литературы

- [1] Kumar A., Sidhu J., Goyal A., Tsao J., “Alzheimer Disease”, *StatPearls*, 2021.
- [2] Ennaceur A., “One-trial object recognition in rats and mice: methodological and theoretical issues”, *Behavioural Brain Research*, **215**:2 (2010), 244–254.
- [3] Benice TS, Raber J., “Object recognition analysis in mice using nose-point digital video tracking”, *Journal of Neuroscience Methods*, **168**:2 (2008), 422–430.
- [4] Antunes M, Biala G., “The novel object recognition memory: neurobiology, test procedure, and its modifications”, *Cogn Process*, **13**:2 (2012), 93–110.

**Novel object location behavioral task in mus musculus memory studies**

**Alipov V.I., Toropova K.A., Ivashkina O.I., Anokhin K.V.**

The study of declarative memory is a topical area of neurophysiology. In the present work, we tested the possibility of short-term and long-term memory formation in laboratory mice in the novel object location task. The results indicate the possibility of forming both types of declarative memory using this method. We also showed that glutamatergic system plays crucial role in long-term declarative memory formation.

*Keywords:* declarative memory, novel object location, short-term memory, long-term memory .

## References

- [1] Kumar A., Sidhu J., Goyal A., Tsao J., “Alzheimer Disease”, *StatPearls*, 2021.
- [2] Ennaceur A., “One-trial object recognition in rats and mice: methodological and theoretical issues”, *Behavioural Brain Research*, **215**:2 (2010), 244–254.
- [3] Benice TS, Raber J., “Object recognition analysis in mice using nose-point digital video tracking”, *Journal of Neuroscience Methods*, **168**:2 (2008), 422–430.
- [4] Antunes M, Biala G., “The novel object recognition memory: neurobiology, test procedure, and its modifications”, *Cogn Process*, **13**:2 (2012), 93–110.

# Исследование когнитивных способностей серых ворон при помощи комплекса задач на базе Эзопова теста

Е. А. Диффинэ<sup>1</sup>, А. А. Смирнова<sup>2</sup>

Эзопов тест оценивает способность добыть приманку, плавающую на поверхности воды в узком цилиндре вне пределов досягаемости, путем помещения в него тонущих объектов. Мы исследовали способность серых ворон справиться с модифицированными вариантом этого теста (с пятью типами цилиндров и двумя типами объектов) спонтанно и после обучения с одним цилиндром и одним объектом.

**Ключевые слова:** Эзопов тест, орудийная деятельность, понимание причинно-следственных отношений, серые вороны.

Эзопов тест оценивает способность субъекта добывать приманку, плавающую вне пределов досягаемости на поверхности воды в узком цилиндре, путем помещения в него тонущих объектов для поднятия уровня воды. Детям и животным предлагают выбрать между двумя цилиндрами, один из которых заполнен водой на  $\frac{2}{3}$  (из него можно было добыть приманку, помещая тонущие объекты в воду), а другой - либо пустой, либо заполнен песком или водой на  $\frac{1}{3}$ . В другом варианте теста используют один цилиндр с водой и предлагают выбрать между тонущими и плавающими или большими и маленькими объектами (т.е. подходящими или не подходящими для решения этой задачи орудиями). Решение таких задач с первых проб может свидетельствовать о понимании структуры задачи. Если субъект не решает эту задачу с первых проб, он может обучиться ее решению в ходе повторных предъявлений теста. Однако результат обучения может быть принципиально разным: субъект либо может обучиться последовательности необходимых действий, либо начнет понимать структуру этой задачи. Метаанализ полученных на врановых птицах данных указывает на то, что эти птицы в большинстве случаев решали эти задачи не с первой пробы, а благодаря обучению в

---

<sup>1</sup> Диффинэ Екатерина Андреевна — лаборант-исследователь, Институт перспективных исследований мозга МГУ им. М.В. Ломоносова, e-mail: diffinenok@gmail.com.

Diffine E.A — Research Assistant, Institute for Advanced Brain Studies at the Lomonosov Moscow State University.

<sup>2</sup> Смирнова Анна Анатольевна — ведущий научный сотрудник, кандидат биологических наук, Биологический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова, e-mail: annsmirn1@gmail.com.

Smirnova A.A. — PhD in Biology, Senior Research Associate, Lomonosov Moscow State University, the Faculty of Biology, Department of Higher Nervous Activity.

ходе повторных предъявлений теста [3] [2]. Полученные на разных видах врановых птиц результаты, заметно различаются: кустарниковые сойки начинают решать подобные задачи лишь после сотен проб [5] [6], тогда как грачи и новокаледонские вороны начинали достоверно чаще выбирать «правильный» цилиндр или объект уже после 10–15 проб [1] [4] [7] [8]. Остается неясным, обучались ли птицы при этом чему-то большему, чем предпочтение определенного цилиндра или объекта, и повторению действий, приближающих приманку.

Целью нашей работы было выяснить, могут ли серые вороны справиться с модифицированным вариантом Эзопова теста (с пятью типами цилиндров и двумя типами объектов) спонтанно и после обучения с одним цилиндром и одним объектом. Исследование проводили на 8-ми серых воронах. Всем птицам дали возможность ознакомиться со свойствами компонентов задачи сначала в жилом вольере (месяц), а затем в экспериментальной клетке (5 серий по 15 мин каждая). Для этого к стенке вольера или экспериментальной клетки прикрепляли прозрачные пластиковые цилиндры, часть из которых была заполнена водой или песком либо доверху, либо на  $\frac{1}{3}$ , а некоторые были пустыми. Приманку в цилиндры не помещали. Перед цилиндрами размещали поддон с камнями и кусочками пробки. Несмотря на то, что вороны часто помещают различные объекты в установленные в вольере пластиковые тазы с водой, или в поилки в экспериментальной клетке, в цилиндрах, установленных в вольере, за весь месяц были обнаружены только 4 кусочка пробки, а в экспериментальной клетке вороны не помещали в них никакие объекты.

Далее провели модифицированный нами вариант Эзопова теста, в котором птицам нужно было выбирать между пятью типами цилиндров (два были заполнены водой и песком до уровня, на полсантиметра ниже доступного воронам, т.е. примерно на  $\frac{2}{3}$ ; два были заполнены водой и песком на  $\frac{1}{3}$  и один был пустым) и двумя типами объектов (камнями и кусочками пробки). В каждый из цилиндров помещали личинку мучного хрущака, привязанную к кусочку пробки. Поддон с камнями и кусочками пробки размещали около противоположной стенки клетки. Ворона могла достать приманку, поместив 3–5 камней в цилиндр, заполненный водой на  $\frac{2}{3}$ . Использование пяти цилиндров и проведение лишь трех тестовых сессий (по 10 мин каждая) уменьшило вероятность первого случайного правильного решения и влияние обучения на результат теста. Ни одна из восьми ворон не справилась с Эзоповым тестом (за 3 сессии они не поместила в цилиндры никакие объекты).

Далее всех ворон обучали помещать тонущие объекты в цилиндр, заполненный водой на  $\frac{2}{3}$  (на ее поверхности плавала приманка). Четырех ворон (Родя, Джо, Женя, Дятел) обучали помещать в цилиндр камень, а четырех других (Шнобель, Глаз, Малышка, Клара) – гайку. Объект

помещали на прозрачную платформу, закрепленную на краю цилиндра. После того как ворона 5 раз получала приманку, сбрасывая объекты в воду, платформу перемещали ниже. Шесть ворон удалось обучить поднимать объекты с пола и помещать их в цилиндр за 17 (Родя), 24 (Дятел) и 51 (Джо), 5 (Клара), 15 (Глаз) и 23 (Малышка) пробы (пробу считали выполненной, когда ворона добывала приманку с поверхности воды).

Для того, чтобы получение приманки было ассоциировано со всеми типами цилиндров, а не только с заполненным водой на  $\frac{2}{3}$ , птицам дали возможность получить приманку из остальных 4-х типов цилиндров (их предъявляли одновременно). Для того, чтобы приманка стала доступной, в нижней части трех из них (заполненных водой и песком на  $\frac{1}{3}$  и пустом) проделали отверстия, а в четвертый цилиндр песок насыпали почти доверху. Провели столько проб, чтобы каждая из ворон получила приманку из каждого из этих четырех типов цилиндров не меньшее число раз, чем ранее из цилиндра, заполненного водой на  $\frac{2}{3}$ . Анализ первых пяти проб этой серии показал, что две птицы (Родя и Дятел) помещали в эти цилиндры камни, хотя делать это для получения приманки не требовалось.

Далее повторно провели Эзопов тест с пятью типами цилиндров и двумя типами объектов. Ни одна из шести ворон за три десятиминутные тестовые сессии не добыла приманку. Только три птицы помещали в цилиндры какие-либо объекты. Родя бросил 3 камня в цилиндр, заполненный водой на  $\frac{2}{3}$ , а следующий камень он положил в цилиндр, заполненный песком на  $\frac{2}{3}$ . Дятел поместил 2 камня и 1 кусочек пробки в цилиндр, заполненный песком на  $\frac{2}{3}$ , и 3 камня – в цилиндр, заполненный водой на  $\frac{2}{3}$ . Глаз поместил кусочек пробки и камень в цилиндр, заполненный песком на  $\frac{1}{3}$ . Надо отметить, что для трех птиц (Малышка, Глаз, Клара) камни были новыми объектами – их обучали помещать в цилиндр гайки. Отрицательный результат второго теста свидетельствует о том, что обучения с одним цилиндром и одним типом объектов оказалось недостаточным для того, чтобы вороны могли решить эту задачу в новой ситуации – с пятью цилиндрами, новым типом тонущего объекта и объектами, размещенными не рядом с цилиндрами.

Следующие серии проводили с тремя воронами (Малышка, Глаз, Клара). Выясняли, смогут ли птицы справиться с тестом если его упростить: расположить объекты около цилиндров или заменить новые объекты на знакомые. Длительность каждой сессии увеличили до 20 минут. Вначале камни и кусочки пробки поместили около цилиндров. Птицы не помещали в цилиндры никакие объекты. Затем камни заменили на гайки (объекты, которые были использованы при обучении), вновь разместив их около противоположной стенки. Одна из птиц (Клара) добывала приманку из цилиндра, заполненного водой на  $\frac{2}{3}$  в каждой из трех 20-минут-



ных сессий (она ни разу не помещала в цилиндры кусочки пробки). Для двух других ворон задачу дополнительно упростили, поместив гайки и кусочки пробки около цилиндров. Ни одна из них и в этом случае не достала приманку. Глаз в двух пробах из трех помещал гайки в цилиндр, заполненный песком на  $\frac{1}{3}$ . Малышка помещала гайки во все типы цилиндров, кроме пустого, но приманку достать ей не удалось. Таким образом, лишь одна из трех ворон справилась с тестом с пятью цилиндрами, но только в том случае, когда ей предоставили знакомые объекты.

Далее мы выясняли, могут ли вороны справиться с Эзоповым тестом в новой ситуации (с пятью цилиндрами и новым типом объектов) после обучения с двумя новыми объектами. Трех ворон обучили добывать приманку из единственного цилиндра, заполненного водой на  $\frac{2}{3}$ , вначале при помощи черных болтов, а затем – серебристых цилиндров (объекты размещали около основания цилиндра). Все три птицы с первой пробы начали помещать новые объекты в цилиндр и добывать приманку. Для того, чтобы получение приманки было ассоциировано со всеми типами цилиндров, а не только с использованным в ходе обучения, птицам вновь дали возможность получить приманку из остальных 4-х типов цилиндров. После этого вновь провели Эзопов тест с пятью цилиндрами и новым типом объектов (золотистыми цилиндрами), которые разместили около цилиндров. С тестом справилась лишь одна из трех ворон - Клара. Она добывала приманку во всех трех тестовых сессиях, и не помещала объекты в другие цилиндры.

В целом можно заключить, что Эзопов тест оказался для ворон сложным. Ни одна из 8-ми ворон не справилась с его модифицированным вариантом (с пятью типами цилиндров и двумя типами объектов) спонтанно. Ни одна из 4-х ворон не справилась с простейшим вариантом этого теста - с одним цилиндром и одним типом объектов. Обучения с одним типом объектов оказалось недостаточным для того, чтобы вороны справились с этой задачей в новой ситуации - с пятью цилиндрами, новым типом тонущего объекта и объектами, размещенными не рядом с цилиндрами. После обучения с одним типом объектов лишь одна из трех ворон решила Эзопов тест с пятью цилиндрами и двумя типами объектов, но лишь тогда, когда ей предоставили знакомые тонущие объекты. После обучения с двумя новыми типами объектов лишь эта же ворона справилась с Эзоповым тестом с пятью цилиндрами и новым типом тонущего объекта.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ (проект №20-015-00287А), в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 121032500080-8) и при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы

## Список литературы

- [1] Bird C.D., Emery N.J., “Rooks use stones to raise the water level to reach a floating worm.”, *Curr. Biol*, **19** (2009), 1410-1414, doi.org/10.1016/j.cub.2009.07.033.
- [2] Ghirlanda S., Lind J., “‘Aesop’s fable’ experiments demonstrate trial-and-error learning in birds, but no causal understanding”, *Anim. Behav*, **123** (2017), 239–247, doi.org/10.1016/j.anbehav.2016.10.029.
- [3] Hennefield L., Hwang H.G., Weston S.J., Povinelli D.J., “Meta-analytic techniques reveal that corvid causal reasoning in the Aesop’s Fable paradigm is driven by trial-and-error learning.”, *Anim. Cogn.*, **21** (2018), 735-748, doi.org/10.1007/s10071-018-1206-y.
- [4] Taylor A., Elliffe D., Hunt G., Emery N., Clayton N., Gray R., “New Caledonian crows learn the functional properties of novel tool types”, *PLoS One*, **6**:12 (2011), PP. e26887, doi.org/10.1371/journal.pone.0026887.
- [5] Cheke L., Bird C., Clayton N., “Tool-use and instrumental learning in the Eurasian jay (*Garrulus glandarius*)”, *Anim. Cogn.*, **14**:3 (2011), 441-455, doi.org/10.1007/s10071-011-0379-4.
- [6] Logan C., Harvey B., Schlinger B., Rensel M., “Western scrub-jays do not appear to attend to functionality in Aesop’s Fable experiments”, *PeerJ*, **4** (2016), PP. e1707, dx.doi.org/10.7717.
- [7] Jelbert S., Taylor A., Cheke L., Clayton N., Gray R., “Using the Aesop’s Fable Paradigm to Investigate Causal Understanding of Water Displacement by New Caledonian Crows”, *PLoS One*, **9**:3 (2014), PP. e92895, doi.org/10.1371/journal.pone.0092895.
- [8] Logan C., Jelbert S., Breen A., Gray R., Taylor A., “8. Modifications to the Aesop’s Fable Paradigm Change New Caledonian Crow Performances”, *PLoS One*, **9**:7 (2014), PP. e103049, doi.org/10.1371/journal.pone.0103049.

**Investigating the cognitive abilities of hooded crows using a set of tasks based on the aesop test**  
**Diffine E.A., Smirnova A.A.**

The Aesop's test assesses the ability to catch bait floating on the surface of the water in a narrow cylinder out of reach by placing drowning objects in it. We investigated the ability of hooded crows with a modified version of this test (with five types of cylinders and two types of objects) spontaneously and after training with one cylinder and one object.

*Keywords:* Aesop's fable paradigm, understanding cause-and-effect relationships, tool-use, hooded crows.

## References

- [1] Bird C.D., Emery N.J., "Rooks use stones to raise the water level to reach a floating worm.", *Curr. Biol*, **19** (2009), 1410-1414, doi.org/10.1016/j.cub.2009.07.033.
- [2] Ghirlanda S., Lind J., "'Aesop's fable' experiments demonstrate trial-and-error learning in birds, but no causal understanding", *Anim. Behav*, **123** (2017), 239-247, doi.org/10.1016/j.anbehav.2016.10.029.
- [3] Hennefield L., Hwang H.G., Weston S.J., Povinelli D.J., "Meta-analytic techniques reveal that corvid causal reasoning in the Aesop's Fable paradigm is driven by trial-and-error learning.", *Anim. Cogn.*, **21** (2018), 735-748, doi.org/10.1007/s10071-018-1206-y.
- [4] Taylor A., Elliffe D., Hunt G., Emery N., Clayton N., Gray R., "New Caledonian crows learn the functional properties of novel tool types", *PLoS One*, **6**:12 (2011), PP. e26887, doi.org/10.1371/journal.pone.0026887.
- [5] Cheke L., Bird C., Clayton N., "Tool-use and instrumental learning in the Eurasian jay (*Garrulus glandarius*)", *Anim. Cogn.*, **14**:3 (2011), 441-455, doi.org/10.1007/s10071-011-0379-4.
- [6] Logan C., Harvey B., Schlinger B., Rensel M., "Western scrub-jays do not appear to attend to functionality in Aesop's Fable experiments", *PeerJ*, **4** (2016), PP. e1707, dx.doi.org/10.7717.
- [7] Jelbert S., Taylor A., Cheke L., Clayton N., Gray R., "Using the Aesop's Fable Paradigm to Investigate Causal Understanding of Water Displacement by New Caledonian Crows", *PLoS One*, **9**:3 (2014), PP. e92895, doi.org/10.1371/journal.pone.0092895.
- [8] Logan C., Jelbert S., Breen A., Gray R., Taylor A., "8. Modifications to the Aesop's Fable Paradigm Change New Caledonian Crow Performances", *PLoS One*, **9**:7 (2014), PP. e103049, doi.org/10.1371/journal.pone.0103049.

# Исследование механизмов формирования пожизненной памяти в когнитивных системах на модели посттравматического стрессового расстройства у мышей

Т. А. Заморина<sup>1</sup>, К. А. Торопова<sup>2</sup>, О. И. Ивашкина<sup>3</sup>, К. В. Анохин<sup>4</sup>

Данное исследование направлено на выяснение механизмов формирования памяти в естественных когнитивных системах на модели посттравматического стрессового расстройства у мышей. В работе был определен паттерн активности структур мозга мыши при развитии и нарушении формирования посттравматического стрессового расстройства и показаны отличия в уровне активации отдельных структур системы страха при формировании травматической и аверсивной памяти.

**Ключевые слова:** когнитивные системы; память; посттравматическое стрессовое расстройство; аверсивное обучение; блокада синтеза белка; c-fos.

Память – определяющее свойство когнитивных систем. Одно из ключевых свойств памяти человека и животных – способность с одного раза и надолго, часто на всю жизнь, запоминать релевантные события. Современные системы искусственного интеллекта не способны воспроизводить это свойство естественных когнитивных систем, что заставляет специалистов в данной области вновь обратить внимание на еще не использованные возможности биологических нейронных сетей [3]. В то же время в нейробиологии на сегодняшний день не существует надежной модели, позволяющей исследовать формирование пожизненной памяти. Одной

---

<sup>1</sup> *Заморина Татьяна Александровна* – аспирантка каф. высшей нервной деятельности биологического ф-та МГУ, e-mail: motorina1814@mail.ru.

*Zamorina Tatyana Aleksandrovna* – graduate student, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Biology, Chair of Higher Nervous Activity.

<sup>2</sup> *Торопова Ксения Александровна* – младший научный сотрудник института перспективных исследований мозга МГУ, e-mail: xen.alexander@gmail.com.

*Toropova Ksenia Aleksandrovna* – junior research associate, Advanced brain research institute, Moscow State University.

<sup>3</sup> *Ивашкина Ольга Игоревна* – младший научный сотрудник института перспективных исследований мозга МГУ, e-mail: oivashkina@gmail.com.

*Ivashkina Olga Igorevna* – junior research associate, Advanced brain research institute, Moscow State University.

<sup>4</sup> *Анохин Константин Владимирович* – директор института перспективных исследований мозга МГУ, e-mail: k.anokhin@gmail.com.

*Anokhin Konstantin Vladimirovich* – Prof., Advanced brain research institute, Moscow State University.

из потенциальных ситуаций, в которых может быть получена такая память, является модель индукции посттравматического стрессового расстройства (ПТСР) у мышей путем нанесения сильного электрокожного раздражения (ЭКР) [6, 1]. Память, формируемая животными в данной модели, отличается устойчивостью к угашению и характеризуется перестройками в поведении, носящими долговременный характер [7, 2].

В ряде исследований была показана необходимость белкового синтеза, а также экспрессии транскрипционного фактора *c-fos* как для формирования нормальной аверсивной [5], так и травматической памяти [4]. Однако неизвестно, имеют ли место качественные отличия в активации структур мозга при формировании травматической и аверсивной памяти. Блокада синтеза новых белков в мозге приводит к нарушению развития ПТСР в модели на мышах [4], но также остается неясным возвращается ли при этом к норме активность мозга. В данной работе мы исследовали паттерн активности мозга мышей при формировании и извлечении травматической и нормальной аверсивной памяти, а также при нарушении развития ПТСР путем блокады синтеза белка.

Для индукции ПТСР мышам наносили 3 удара током силой 1,5 мА и длительностью 10 с (далее – группа ПТСР), для формирования аверсивной памяти обучали животных в парадигме условно-рефлекторного замирания (УРЗ), нанося 1 удар током силой 1,0 мА и длительностью 2 с. Животные контрольной группы не получали ЭКР в экспериментальной камере – группа активного контроля (АК), либо находились в домашней клетке на протяжении эксперимента – группа пассивного контроля (ПК). Через семь дней после обучения животных помещали в ту же обстановку для тестирования памяти. На следующий день проводили тестирование на сенситизацию в новой обстановке и при подаче нового незнакомого животным звука (громкость 80 дБ, частота 9 кГц) [7].

Для сопоставления паттернов активности мозга при формировании травматической и нормальной аверсивной памяти мы брали образцы мозга животных групп ПТСР, УРЗ и АК спустя 90 минут после нанесения ЭКР.

Чтобы сравнить активность мозга мышей при развитии и нарушении развития ПТСР, животным вводили циклогексимид (100 мг/кг) либо физраствор за 30 минут до обучения. Через семь дней после нанесения ЭКР животных повторно помещали в экспериментальную обстановку для извлечения памяти, затем брали образцы мозга животных. Для определения уровня активности структур мозга использовали метод иммуногистохимического картирования экспрессии гена *c-fos*.

Непосредственно после получения ЭКР животные группы УРЗ и ПТСР демонстрировали более длительное время замирания по сравнению с контрольными животными. При этом мыши, группы ПТСР за-

мирили больше, чем мыши группы УРЗ. При тестировании в той же обстановке обе группы животных, ПТСР и УРЗ, замирали достоверно дольше, чем животные контрольной группы. При помещении в новую обстановку и предъявлении незнакомого звука животные групп ПТСР и УРЗ замирали больше, чем контрольные животные. При этом у животных группы ПТСР уровень замирания был выше, по сравнению с группой УРЗ. Таким образом, в данной модели индукции ПТСР мыши сформировали травматическую память, сопряженную с более высоким уровнем страха у животных непосредственно после получения травматического опыта, при извлечении памяти, а также сопровождающуюся развитием сенситизации.

При формировании травматической и аверсивной памяти у групп ПТСР и УРЗ активировался сходный набор структур мозга: миндалина, прелимбическая, инфраламбическая и цингулярная области коры, а также поля СА1 и СА3. Однако формирование травматической памяти сопровождалось усиленной активацией латерального и базолатерального ядер миндалины, прелимбической коры и зубчатой фации гиппокампа. Циклогексимида не оказывал острого влияния на поведение животных непосредственно после нанесения ЭКР. При извлечении памяти через 7 дней животные, получившие инъекцию циклогексимида перед нанесением ЭКР, замирали меньше, чем животные, получившие инъекцию физраствора, и не отличались по уровню замирания от мышей с аверсивной памятью. Уровень активности при извлечении памяти у животных, получивших инъекцию циклогексимида, был достоверно ниже, чем у животных, получивших инъекцию физраствора, в базолатеральном и центральном ядрах миндалины, цингулярной коре, поле СА3 гиппокампа, паравентрикулярном ядре таламуса и околосеротониновом сером веществе. При этом уровень активности большинства структур у животных, получивших блокатор синтеза белка, не отличался от такового у животных группы пассивного контроля. Таким образом, блокада синтеза белка при индукции ПТСР привела к нормализации уровня активности мозга и нарушила формирование травматической памяти, тогда как ассоциативный компонент памяти оставался сохранным.

Сопоставление паттернов активности мозга мышей при формировании травматической памяти в модели ПТСР и аверсивной памяти при обучении условному рефлексу замирания показало, что оба случая сопровождаются активацией сходного набора структур. Показанные различия носят количественный характер: часть структур (миндалина и прелимбическая кора) при индукции ПТСР активируются сильнее, чем при формировании аверсивной памяти.

Введение животным ингибитора синтеза белка циклогексимида в момент индукции ПТСР приводит к нормализации уровня активации ряда

структур мозга, в том числе прелимбической коры и базолатерального ядра миндалина, при извлечении памяти о травматическом опыте. При этом поведение животных при нарушении развития ПТСР соответствует поведению животных с нормальной аверсивной памятью. Таким образом, в результате блокады синтеза белка в момент получения травматического опыта происходит изменение поведения и паттернов активности мозга в сторону характерных для извлечения нормальной аверсивной памяти – то есть существенно нарушается развитие ПТСР в модели на мышах.

Данные результаты позволяют предположить, что травматическая память в модели ПТСР имеет сходные механизмы формирования с нормальной аверсивной памятью, при этом ассоциативный компонент травматической памяти обладает особой устойчивостью к достаточно агрессивным воздействиям, а именно блокаде синтеза белка, что является аргументом в пользу использования данной модели для воспроизведения формирования пожизненной одномоментной памяти на лабораторных животных в дальнейших исследованиях памяти в естественных когнитивных системах.

Исследование выполнено при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Мозг, когнитивные системы, искусственный интеллект», Некоммерческого Фонда развития науки и образования «Интеллект», а также гранта РФФИ №20-015-00427.

## Список литературы

- [1] Торопова К.А., Анохин К.В., “Моделирование посттравматического стрессового расстройства у мышей: нелинейная зависимость от силы травматического воздействия”, *Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова*, **68:3** (2018), 378–394.
- [2] Торопова К.А., Ивашкина О.И., Иванова А.А., Коновалова Е.В., Долгов О.Н., Анохин К.В., “Долговременные изменения спонтанного поведения и экспрессии c-Fos в мозге мышей в состоянии покоя в модели посттравматического стрессового расстройства”, *Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова*, **70:5** (2020), 668–681.
- [3] Chance F. S., Aimone J. B., Musuvathy S. S., Smith M. R., Vineyard C. M., Wang F., “Crossing the cleft: communication challenges between neuroscience and artificial intelligence”, *Front. Comput. Neurosci.*, **14** (2020), 39.

- [4] Kozlovsky N., Matar M. A., Kaplan Z., Kotler M., Zohar J., Cohen H., “The immediate early gene Arc is associated with behavioral resilience to stress exposure in an animal model of posttraumatic stress disorder”, *Eur. Neuropsychopharmacol.*, **18**:2 (2008), 107–116.
- [5] Schafe G. E., Nadel N. V, Sullivan G. M., Harris A., LeDoux J. E., “Memory consolidation for contextual and auditory fear conditioning is dependent on protein synthesis, PKA, and MAP kinase”, *Learn. Mem.*, **6**:2 (1999), 97–110.
- [6] Siegmund A., Wotjak C. T., “Toward an animal model of posttraumatic stress disorder”, *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, **1071**:1 (2006), 324–334.
- [7] Siegmund A., Wotjak C. T., “A mouse model of posttraumatic stress disorder that distinguishes between conditioned and sensitised fear”, *J. Psychiatr. Res.*, **41**:10 (2007), 848–860.

**Life-long memory formation mechanisms in the mouse model of posttraumatic stress disorder**

**Zamorina T.A., Toropova K.A., Ivashkina O.I., Anokhin K.V.**

This study is aimed at elucidating the mechanisms of memory formation in cognitive systems using a mouse model of post-traumatic stress disorder (PTSD). The pattern of activation of brain structures during the development and prevention of PTSD was investigated. Differences were shown in the level of activation of the structures of the fear network of the brain during the development of PTSD and the formation of aversive memory.

**Keywords:** cognitive systems; memory; post-traumatic stress disorder; aversive learning; protein synthesis inhibition; c-fos.

## References

- [1] Toropova K.A., Anokhin K.V., “Modeling of post-traumatic stress disorder in mice: nonlinear dependence on the strength of traumatic impact”, *I.P. Pavlov journal of higher nervous activity*, **68**:3 (2018), 378–394 (In Russian).
- [2] Toropova K.A., Ivashkina O.I., Ivanova A.A., Konovalova E.V., Dolgov O.N., Anokhin K.V., “Long-term changes in spontaneous behavior and expression of c-Fos in the brains of mice at rest in a model of post-traumatic stress disorder”, *I.P. Pavlov journal of higher nervous activity*, **70**:5 (2020), 668–681 (In Russian).



- [3] Chance F. S., Aimone J. B., Musuvathy S. S., Smith M. R., Vineyard C. M., Wang F., “Crossing the cleft: communication challenges between neuroscience and artificial intelligence”, *Front. Comput. Neurosci.*, **14** (2020), 39.
- [4] Kozlovsky N., Matar M. A., Kaplan Z., Kotler M., Zohar J., Cohen H., “The immediate early gene Arc is associated with behavioral resilience to stress exposure in an animal model of posttraumatic stress disorder”, *Eur. Neuropsychopharmacol.*, **18**:2 (2008), 107–116.
- [5] Schafe G. E., Nadel N. V, Sullivan G. M., Harris A., LeDoux J. E., “Memory consolidation for contextual and auditory fear conditioning is dependent on protein synthesis, PKA, and MAP kinase”, *Learn. Mem.*, **6**:2 (1999), 97–110.
- [6] Siegmund A., Wotjak C. T., “Toward an animal model of posttraumatic stress disorder”, *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, **1071**:1 (2006), 324–334.
- [7] Siegmund A., Wotjak C. T., “A mouse model of posttraumatic stress disorder that distinguishes between conditioned and sensitised fear”, *J. Psychiatr. Res.*, **41**:10 (2007), 848–860.

# Сопоставление паттернов экспрессии генов *c-fos* и *arc* в головном мозге мышей при формировании и извлечении обстановочной ассоциативной памяти

Л. С. Казанская<sup>1</sup>, О. И. Ивашкина<sup>2</sup>, К. А. Торопова<sup>3</sup>, К. В. Анохин<sup>4</sup>

В работе проводили оценку индукции немедленных ранних генов *c-fos* и *Arc/Arg3.1* в мозге мышей после формирования и извлечения памяти в задаче условно-рефлекторного замирания на обстановку. Показано, что при данном воздействии в ряде структур мозга происходит индукция обоих генов, однако только в 30% нейронов экспрессируются одновременно оба гена.

**Ключевые слова:** немедленные ранние гены; *c-Fos*; *Arc*; нейропластичность; энграмма

## 1. Актуальность

Одним из ключевых этапов консолидации долговременной памяти является экспрессия немедленных ранних генов (НРГ), которые запускают в нейронах процессы синаптической пластичности. Нейроны, экспрессировавшие данные гены во время обучения, можно отнести к энграммным клеткам, поскольку их реактивация способна вызывать извлечение памяти у животных [1, 2]. На сегодняшний день известно большое количество НРГ, однако, вопрос о том, частично или полностью совпадают популяции нейронов, экспрессирующие разные НРГ, изучен недостаточно.

---

<sup>1</sup> *Казанская Лидия Сергеевна* — Аспирант, лаборант-исследователь, ФГБНУ НИИ нормальной физиологии им. П.К. Анохина, e-mail: lidia.kazanskaya@gmail.com.

*Kazanskaya Lidiya Sergeevna* — ?

<sup>2</sup> *Ивашкина Ольга Игоревна* — Младший научный сотрудник, НИЦ «Курчатовский Институт», Москва, Россия, e-mail: oivashkina@gmail.com.

*Ivashkina Olga Igorevna* — Junior Researcher, NRC «Kurchatov Institute, Institute of Advanced Brain Studies of Lomonosov MSU

<sup>3</sup> *Торопова Ксения Александровна* — Младший научный сотрудник, НИЦ «Курчатовский Институт», Москва, Россия. Институт перспективных исследований мозга МГУ им. М.В. Ломоносова, e-mail: xen.alexander@gmail.com.

*Toropova Ksenia Aleksandrovna* — Junior Researcher, NRC «Kurchatov Institute, Institute of Advanced Brain Studies of Lomonosov MSU

<sup>4</sup> *Анохин Константин Владимирович* — Институт перспективных исследований мозга МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия. Заведующий лабораторией, ФГБНУ НИИ нормальной физиологии им. П.К. Анохина, e-mail: k.anokhin@gmail.com.

*Anokhin Konstantin Vladimirovich* — Director of Institute of Advanced Brain Studies of Lomonosov MSU, Academician of Russian Academy of Sciences, Professor, Doctor of Sciences in Medicine

В данном исследовании для сравнения паттернов экспрессии были выбраны НРГ *c-fos* и *Arg/Arg3.1*. Оба этих гена хорошо изучены, проявляют высокую активность в мозге при обучении, могут экспрессироваться в нейронах практически всех отделов мозга и при этом имеют низкий базальный уровень экспрессии [3, 4], что важно для выявления энграмм. Однако, роли *c-fos* и *Arg* в пластичности нейрона значительно различаются. Так, белок *Arg* сразу же после синтеза вовлекается в структурные изменения нейрона, тогда как влияние транскрипционного фактора *c-Fos* можно наблюдать только после второй волны синтеза белка. В то время как *Arg* преимущественно ослабляет синапсы в дендритах [5], *c-Fos* опосредует менее специфические изменения, захватывающие нейрон целиком: например, способствует образованию новых синапсов [6], синтезу некоторых нейромедиаторов [3] и росту аксона [7]. Кроме того, данные гены имеют различия в структуре промоторов [8], таким образом, они могут экспрессироваться в разное время после когнитивного воздействия или в разных нейронах.

## 2. Методика

В исследовании были использованы 5 групп мышей C57Bl/6: а) животные после однократного обучения условно-рефлекторному замиранию на обстановку ( $n=7$ ); б) активный контроль (АК), взятый после обучения ( $n=7$ ); в) животные после тестирования памяти ( $n=7$ ); г) АК, взятый после тестирования памяти ( $n=7$ ); д) пассивный контроль (ПК), взятый из домашней клетки ( $n=4$ ). В ходе обучения животных на 3 минуты помещали в камеру с электродным полом и подавали электро-кожное раздражение (ЭКР) силой 1мА на 2с спустя 2 минуты обследования обстановки. Тестирование памяти происходило через 24 часа после обучения и представляло собой помещение в ту же камеру на 3 минуты без ЭКР. Животные из групп АК проходили через те же процедуры, что и опытные животные, но не получали ЭКР при обучении. Всех животных спустя 90 минут после поведенческих процедур умерщвляли летальной дозой хлоралгидрата и подвергали перфузии с раствором формальдегида. Срезы мозга животных толщиной 50мкм изготавливали на вибраторе, а затем использовали для двойного иммуногистохимического окрашивания на белки *c-Fos* и *Arg*. На изображениях срезов, полученных при помощи конфокального микроскопа Olympus FluoView FV10i, вручную в программе ImaRis был проведён подсчёт числа клеток, меченых по *c-Fos*, по *Arg* и клеток, содержащих обе метки. Последние считались клетками с колокализацией экспрессии. В дальнейшем рассчитывали количество клеток с колокализацией экспрессии относительно всех *c-Fos+* или *Arg+* клеток.

### 3. Результаты

Иммуногистохимический анализ показал индукцию c-fos и Arc в ответ на новизну: было показано увеличение количества c-Fos+ и Arc+ во многих исследованных структурах мозга животных экспериментальных групп и групп АК по сравнению с ПК. Однако, между опытной группой и соответствующим АК уровень экспрессии как c-fos, так и Arc ни в одной структуре значимо не различался.

После обучения уровни экспрессии c-fos и Arc у животных опытной группы были значимо повышены в ретроспленальной и париетальной коре по сравнению с ПК. При этом в ретроспленальной коре не было значимых различий между количеством Arc+ и c-Fos+ нейронов, а в париетальной коре количество Arc+ клеток было значимо большим, чем количество c-Fos+ клеток у обученных животных. В гиппокампе как у животных группы обучения, так и у АК, не наблюдалось увеличение экспрессии c-fos и Arc по сравнению с ПК, но количество Arc+ нейронов значимо превосходило количество c-Fos+ нейронов.

После тестирования памяти в гиппокампе также не наблюдалось различий в уровне экспрессии генов между ПК и экспериментальной группой, а также группой АК, но численность Arc+ клеток в этих группах была значимо большей, чем численность c-Fos+ клеток. Похожий паттерн наблюдался и в цингулярной коре, где по обоим генам не было обнаружено значимых различий с ПК, но количество Arc+ нейронов была значимо большим, чем количество c-Fos+ нейронов только в группе АК. В миндалине и инфраламбической коре уровни экспрессии c-fos и Arc были повышены по сравнению с ПК, но не различались между собой.

Важно отметить, что независимо от исследуемой структуры мозга, поведенческой задачи и индивидуальных уровней экспрессии c-fos и Arc, между двумя популяциями меченых клеток было только частичное перекрытие, при котором порядка 30% клеток, экспрессировавших один ген, также экспрессировали второй. Объяснением небольшому перекрытию популяций c-Fos+ и Arc+ клеток при сопоставимой численности этих популяций может служить их неодинаковое распределение по кортикальным слоям и субполям гиппокампа, которое наблюдалось визуально при подсчёте клеток. Подробный анализ данного явления будет проведён в продолжении данной работы.

### 4. Заключение

Наши результаты показывают, что белки c-Fos и Arc не являются эквивалентными маркерами нервной активности, индуцированной стимулом, поскольку они экспрессируются в популяциях клеток, различных более

чем на 60%. При этом популяция Arg3.1 клеток насчитывала больше нейронов.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № 075-15-2020-801) и междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Мозг, когнитивные системы, искусственный интеллект».

## Список литературы

- [1] Ghandour K, Ohkawa N, Fung CCA, Asai H, Saitoh Y, Takekawa T, Okubo-Suzuki R, Soya S, Nishizono H, Matsuo M, Osanai M, Sato M, Ohkura M, Nakai J, Hayashi Y, Sakurai T, Kitamura T, Fukai T, Inokuchi K, “Orchestrated ensemble activities constitute a hippocampal memory engram.”, *Nat Commun.*, **10**:1 (2019), 2637 10.1038/s41467-019-10683-2.
- [2] Lacagnina AF, Brockway ET, Crovetti CR, Shue F, McCarty MJ, Sattler KP, Lim SC, Santos SL, Denny CA, Drew MR., “Distinct hippocampal engrams control extinction and relapse of fear memory”, *Nat Neurosci.*, **22**:5 (2019), 753–761 10.1038/s41593-019-0361-z.
- [3] Herdegen T, Leah JD., “Inducible and constitutive transcription factors in the mammalian nervous system: control of gene expression by Jun, Fos and Krox, and CREB/ATF proteins.”, *Brain Res Brain Res Rev.*, **28**:3 (1998), 370-490 10.1016/s0165-0173(98)00018-6.
- [4] Korb E, Finkbeiner S., “Arc in synaptic plasticity: from gene to behavior”, *Trends Neurosci.*, **34**:11 (2011), 591-598 10.1016/j.tins.2011.08.007.
- [5] Minatohara K, Akiyoshi M, Okuno H., “Role of Immediate-Early Genes in Synaptic Plasticity and Neuronal Ensembles Underlying the Memory Trace”, *Front Mol Neurosci.*, **8** (2016), 78 10.3389/fnmol.2015.00078.
- [6] Kleim JA, Lussnig E, Schwarz ER, Comery TA, Greenough WT., “Synaptogenesis and Fos expression in the motor cortex of the adult rat after motor skill learning”, *J Neurosci.*, **16**:14 (1996), 4529-4535 10.1523/jneurosci.16-14-04529.1996.
- [7] Jessen U, Novitskaya V, Pedersen N, Serup P, Berezin V, Bock E., “The transcription factors CREB and c-Fos play key roles in NCAM-mediated neuriteogenesis in PC12-E2 cells”, *J Neurosci.*, **79**:6 (2001), 1149-1160 10.1046/j.1471-4159.2001.00636.x.
- [8] Flavell SW, Greenberg ME, “Signaling mechanisms linking neuronal activity to gene expression and plasticity of the nervous system”, *Annu Rev Neurosci.*, **31** (2008), 563-590 10.1146/annurev.neuro.31.060407.125631.

### **Comparison Of C-Fos And Arc Genes Expression Patterns In Mouse Brain After Contextual Associative Memory Formation And Retrieval**

**Kazanskaya L.S., Ivashkina O.I., Toropova K.A., Anohin K.V.**

The study evaluated the induction of immediate early genes *c-fos* and *Arc/Arg3.1* in mouse brain after contextual fear conditioning and after memory retrieval. It was shown that the induction of both genes

in a number of brain structures occurs after this exposure, however, only 30% of neurons simultaneously express both genes.

*Keywords:* immediate early genes, c-Fos, Arc, neuroplasticity, engram

## References

- [1] Ghandour K, Ohkawa N, Fung CCA, Asai H, Saitoh Y, Takekawa T, Okubo-Suzuki R, Soya S, Nishizono H, Matsuo M, Osanai M, Sato M, Ohkura M, Nakai J, Hayashi Y, Sakurai T, Kitamura T, Fukai T, Inokuchi K, “Orchestrated ensemble activities constitute a hippocampal memory engram.”, *Nat Commun.*, **10**:1 (2019), 2637 10.1038/s41467-019-10683-2.
- [2] Lacagnina AF, Brockway ET, Crovetto CR, Shue F, McCarty MJ, Sattler KP, Lim SC, Santos SL, Denny CA, Drew MR., “Distinct hippocampal engrams control extinction and relapse of fear memory”, *Nat Neurosci*, **22**:5 (2019), 753–761 10.1038/s41593-019-0361-z.
- [3] Herdegen T, Leah JD., “Inducible and constitutive transcription factors in the mammalian nervous system: control of gene expression by Jun, Fos and Krox, and CREB/ATF proteins.”, *Brain Res Brain Res Rev.*, **28**:3 (1998), 370-490 10.1016/s0165-0173(98)00018-6.
- [4] Korb E, Finkbeiner S., “Arc in synaptic plasticity: from gene to behavior”, *Trends Neurosci.*, **34**:11 (2011), 591-598 10.1016/j.tins.2011.08.007.
- [5] Minatohara K, Akiyoshi M, Okuno H., “Role of Immediate-Early Genes in Synaptic Plasticity and Neuronal Ensembles Underlying the Memory Trace”, *Front Mol Neurosci*, **8** (2016), 78 10.3389/fnmol.2015.00078.
- [6] Kleim JA, Lussnig E, Schwarz ER, Comery TA, Greenough WT., “Synaptogenesis and Fos expression in the motor cortex of the adult rat after motor skill learning”, *J Neurosci*, **16**:14 (1996), 4529-4535 10.1523/jneurosci.16-14-04529.1996.
- [7] Jessen U, Novitskaya V, Pedersen N, Serup P, Berezin V, Bock E., “The transcription factors CREB and c-Fos play key roles in NCAM-mediated neuritogenesis in PC12-E2 cells”, *J Neurosci*, **79**:6 (2001), 1149-1160 10.1046/j.1471-4159.2001.00636.x.
- [8] Flavell SW, Greenberg ME, “Signaling mechanisms linking neuronal activity to gene expression and plasticity of the nervous system”, *Annu Rev Neurosci*, **31** (2008), 563-590 10.1146/annurev.neuro.31.060407.125631.

# Алгоритм SCoBUL обучения без учителя импульсной нейронной сети и его применение для выделения информативных признаков из сигнала DVS камер

М. В. Киселев<sup>1</sup>

Не так давно стал коммерчески доступен принципиально новый вид видеокамер, так называемые DVS камеры (dynamic vision sensor). Применение этих устройств способно радикально улучшить параметры скорости и энергоэкономичности процедур обработки видеосигнала за счет того, что они посылают на обработку не постоянно сканируемый растровый сигнал, а асинхронный поток спайков, индицирующих увеличение или уменьшение яркости отдельных пикселей. Принципиально новый характер посылаемого сигнала требует принципиально новых алгоритмов его обработки. Такой алгоритм, названный SCoBUL (spike correlation based unsupervised learning), описывается в данной работе. SCoBUL использует однослойную импульсную сеть с латеральным торможением для выделения первичных информативных признаков из потока спайков в режиме обучения без учителя. Главной чертой SCoBUL является обобщение законов синаптической пластичности STDP (spike timing dependent plasticity), специально оптимизированное для решения этой задачи.

**Ключевые слова:** DVS камера, импульсная нейронная сеть, нейронная сеть с латеральным торможением, обучение без учителя, синаптическая пластичность, STDP.

## 1. Введение

В последнее десятилетие импульсные нейронные сети (ИНС), класс нейросетевых моделей, основанный на принципах обработки информации, близких к тем, что используются в биологических нейронных ансамблях (главный из которых – импульсный характер обмена информацией), превращается из чисто академического объекта изучения в базу для построения практически применимых устройств с уникальными характеристиками по скорости работы и экономичности. Однако, для того, чтобы эти

---

<sup>1</sup>Киселев Михаил Витальевич — к.т.н., руководитель лаборатории нейроморфных вычислений, Чувашский государственный университет, e-mail: mkiselev1@yandex.ru

Kiselev Mikhail Vitalievich — candidate of technical sciences, Head of the Neuromorphic Computing Laboratory, Chuvash State University

преимущества реализовались, необходимо чтобы все этапы обработки информации, начиная с ее получения, подчинялись тем же принципам. Как ответ на этот запрос, появились, в том числе, видеокамеры, посылающие сигнал, представленный в виде потока импульсов (спайков), так что каждый отдельный спайк отмечает изменение в ту или иную сторону яркости единичного пикселя.

Первичным этапом обработки таких спайковых потоков видеoinформации, является выделение устойчивых структурных признаков, формирующих описание видеообразов, которое на следующих уровнях обработки будет использоваться для решения задач высокоуровневого анализа и распознавания. Эта задача является частным случаем обучения без учителя, так как не предполагается какой-либо предварительной разметки этого спайкового потока. Можно показать, что рассматриваемая задача может быть без потери общности представлена как задача выявления корреляций и антикорреляций между частотами спайков в разных последовательностях спайков в разных временных диапазонах (возможно, также с временным лагом).

Структуры ИНС, используемые для задач обучения без учителя достаточно единообразны – это, как правило, однослойные сети с возбуждающими пластичными связями с входными узлами и сильными непластичными тормозными связями между нейронами. Предложенный в данной работе алгоритм обучения без учителя SCoBUL (spike correlation based unsupervised learning) также использует эту архитектуру. Имея в виду максимально эффективную реализацию ИНС (в том числе, на современных специализированных нейропроцессорах, таких как TrueNorth, Loihi или Алтай – см. обзор в [1]), использована, вероятно, самая простая функциональная модель импульсного нейрона, LIF (leaky integrate-and-fire neuron – пороговый интегратор с утечкой). Основным новшеством данной работы и чертой алгоритма SCoBUL является закон пластичности, оптимизированный для использования в рассматриваемой задаче.

## 2. Оптимизированная модель пластичности SCoBUL

Обучение ИНС принципиально отличается от обучения традиционных нейронных сетей с силу невозможности непосредственного применения методов градиентного спуска к этим дискретным по своей природе системам. В силу этого, обучение ИНС строится на законах синаптической пластичности, подчиняющихся принципу локальности, что означает, что изменения синаптического веса могут зависеть только от характеристик



активности пре- и пост-синаптического нейрона. Классическим примером такого закона пластичности является модель STDP (spike timing dependent plasticity) [2]. Эта модель в определенной степени соответствует биологической реальности, однако многие ее свойства делают ее далеко не оптимальным выбором для решения поставленной задачи. В числе этих негативных свойств – ограничения по распознаванию «размазанных» во времени корреляций из-за раннего срабатывания распознающего нейрона и ослабления синапсов, принявших «запоздавшие» спайки, нерешенность проблемы катастрофического забывания, необратимость полного подавления нейрона и другие. Присутствие в STDP экспоненциальной зависимости от времени делает не очень эффективной ее реализацию на цифровых нейрочипах.

В результате проведенного анализа задачи первичной обработки DVS сигнала с точки зрения ее формализации как задачи выделения статистически значимых корреляций частот спайков, а также на основе предложенной в моих более ранних работах модели пластичности, решающей проблему катастрофического забывания, [3] и требования эффективной реализации на цифровых нейрочипах, в данной работе предлагается новая модель пластичности, являющаяся модификацией классического STDP. Наиболее важные черты этой модели (также названной SCoBUL) следующие:

- Аддитивные законы пластичности применяются не к весу синапса  $w$ , а к монотонно с ним связанной по формуле

$$w = w_{min} + \frac{(w_{max} - w_{min}) \max(W, 0)}{w_{max} - w_{min} + \max(W, 0)}$$

величине синаптического ресурса  $W$ . Очевидно, что, если  $W$  пробегает от  $-\infty$  до  $+\infty$ ,  $w$  изменяется от  $w_{min}$  до  $w_{max}$ . Эта поправка дает эффект стабилизации, противодействия катастрофическому забыванию – если синаптический вес находится в районе насыщения (т.е., когда  $W$  или отрицательный, или очень большой положительный), то шумовые данные или данные, содержащие другие паттерны, не похожие на прежде распознаваемые, не сразу разрушают обученное состояние сети, а лишь после количества предъявлений, сравнимого с тем, которое было использовано для обучения сети.

- Синапсы усиливаются, если получают спайки в пределах небольшого временного окна около постсинаптического спайка, не важно – до или после него. Это дает возможность распознать весь длящийся во времени паттерн, а не только его начальную часть. Спайки, пришедшие вне этого временного окна, всегда ослабляют синапс.

Величины увеличения и уменьшения синаптического ресурса всегда постоянны, что значительно упрощает аппаратную реализацию модели.

- Суммарный синаптический ресурс нейрона остается постоянным. Т.е. если одни синапсы усиливаются, то другие ослабляются и наоборот. Это приводит к более выраженной конкуренции между синапсами и решает проблему непластичности молчащих нейронов.
- Синапсы с большим весом, но редко принимающие участие в генерации постсинаптического спайка, ослабляются. Это дает возможность избежать ситуации, когда один и тот же нейрон распознает несколько некоррелирующих паттернов.

Кроме описанного закона пластичности алгоритм SCoBUL использует динамическую структуру сети – полностью подавленные нейроны разрушаются и пересоздаются заново, получая шанс распознать какие-то еще ранее нераспознанные паттерны в данных.

### 3. Экспериментальное подтверждение

Для экспериментального подтверждения преимуществ модели пластичности SCoBUL перед STDP были проведены эксперименты на созданном мной программном эмуляторе DVS камеры. Например, проводились оценки точности предсказания нейронами сети положения центра светового пятна, движущегося в разных направлениях и с разными скоростями в поле зрения эмулируемой DVS камеры, в 4-мерном фазовом пространстве с метрикой, уравнивающей стандартные отклонения положения пятна в пространственных и скоростных координатах. Для оптимизации гиперпараметров сети в обоих случаях использовался генетический алгоритм, при одинаковых или эквивалентных диапазонах вариации этих параметров. В проведенных экспериментах точность позиционирования пятна сетью с пластичностью SCoBUL оказывалась существенно (на 30% - 45%) выше, чем сетью, использующей классический STDP. В настоящее время проводится исследование по более систематической оценке качества SCoBUL и ограничений его применимости.

### Список литературы

- [1] Ларионов Д., Киселев М., Иванов Д., “Нейроморфные системы ИИ”, *Альманах «Искусственный интеллект»*, 2021, № 9, 49–61.

- [2] Bi G.Q., Poo M.M., “Synaptic modifications in cultured hippocampal neurons: dependence on spike timing, synaptic strength, and postsynaptic cell type”, *Journal of Neuroscience*, **18**:24 (1998), 10464–10472.
- [3] Kiselev M., “Rate Coding vs. Temporal Coding – Is Optimum Between?”, *Proceedings of IJCNN-2016*, 2016, 1355–1359.

**Spiking neural network unsupervised learning algorithm SCoBUL  
and its application to extracting informative features from DVS  
camera signal  
Kiselev M.V.**

A principally new type of video cameras, the so-called DVS (dynamic vision sensors), became commercially available recently. They are capable of enhancing dramatically speed and energy consumption parameters of video signal processing procedures because they send asynchronous stream of spikes indicating brightness change of individual pixels instead of scanned raster data of the whole camera view field. However, this new kind of output signal requires novel algorithms for its processing. Such an algorithm called SCoBUL (spike correlation based unsupervised learning) is described in the present work. SCoBUL uses a one-layer spiking neural network with lateral inhibition for extracting informative features from spike trains in unsupervised learning regime. SCoBUL’s most important feature is a generalization of STDP (spike timing dependent plasticity) rule optimized especially for this task.

*Keywords:* DVS, spiking neural network, network with lateral inhibition, unsupervised learning, synaptic plasticity, STDP.

## References

- [1] Larionov, D., Kiselev, M., Ivanov D., “Neuromorphic systems of AI”, *Almanac «Artificial Intelligence»*, 2021, №9, 49–61 (In Russian).
- [2] Bi G.Q., Poo M.M., “Synaptic modifications in cultured hippocampal neurons: dependence on spike timing, synaptic strength, and postsynaptic cell type”, *Journal of Neuroscience*, **18**:24 (1998), 10464–10472.
- [3] Kiselev M., “Rate Coding vs. Temporal Coding – Is Optimum Between?”, *Proceedings of IJCNN-2016*, 2016, 1355–1359.

# Исследование когнитивных способностей серых ворон при помощи нового типа протоорудийных задач

К. Н. Кубенко<sup>1</sup>, А. А. Смирнова<sup>2</sup>

Протоорудийные задачи используют для изучения наглядно-действенного мышления животных. Мы разработали новый комплекс протоорудийных задач на подтягивание приманки при помощи выскальзывающей веревки и исследовали способность серых ворон понимать их структуру спонтанно и после обучения.

**Ключевые слова:** орудийная деятельность, протоорудийные задачи, понимание причинно-следственных отношений, мышление, серые вороны

Орудийные и протоорудийные задачи используют для исследования наглядно-действенного мышления животных или детей. Протоорудийными называют задачи, в которых орудие заранее совмещено с приманкой или прикреплено к ней. В наиболее часто используемом варианте таких задач субъекту предъявляют на выбор две веревки, к одной из которых прикреплена приманка. Врановые и попугаеобразные ([1, 2, 3, 4]), в отличие от птиц с менее развитым мозгом ([5, 6, 7]) и хищных млекопитающих ([8, 9]) даже в сложных вариантах таких задач, в которых приманку размещают рядом с концом “пустой” нити, достоверно чаще выбирают нить, соединенную с приманкой, уже в первых 10–30 пробах. Это может свидетельствовать о понимании ими структуры этой задачи.

Другой тип протоорудийной задачи (подтягивание приманки при помощи выскальзывающей веревки) используют в тестах, оценивающих способность животных к кооперации. В таких тестах для того, чтобы добыть приманку, надо одновременно с партнером потянуть за оба конца веревки, пропущенной через петли на подносе с кормушками. Если же за веревку тянет одно животное, то она выскальзывает из петель и приманка остается недоступной. При обсуждении результатов этих тестов возникает вопрос не только о преднамеренности кооперации, но и о понимании животными структуры этой протоорудийной задачи ([10, 11]). Пе-

---

<sup>1</sup> *Кубенко Ксения Николаевна* — студент Биологического ф-та МГУ, e-mail: kubencko.k@mail.ru.

*Kubenko Ksenia Nikolaevna* — student, Faculty of Biology, Lomonosov Moscow State University

<sup>2</sup> *Смирнова Анна Анатольевна* — ведущий научный сотрудник Биологического ф-та МГУ, e-mail: annsmirn1@gmail.com.

*Smirnova Anna Anatolievna* — leading researcher, Faculty of Biology, Lomonosov Moscow State University

ред тестом на кооперацию каждое животное обучают подтягивать поднос за два конца веревки, но чему именно они при этом обучаются на сегодняшний день остается неизвестным.

В связи с этим целью нашей работы было разработать комплекс протоуродийных задач на подтягивание приманки при помощи выскальзывающей нити и оценить способность серых ворон понимать их структуру.

Вначале мы отбирали ворон, которые могут справиться со сложным вариантом задачи на подтягивание приманки при помощи веревки. Семи птицам вначале предъявляли одну веревку с приманкой. После того как они 10 раз подтянули приманку, им предъявили две параллельные веревки (расположенные перпендикулярно переднему краю клетки), к одной из которых была привязаны приманка. После того как птицы не менее 9 раз в 10 последовательных пробах выбирали веревку с приманкой, им предъявили усложненный вариант этой задачи, в которой две веревки расположили под углом  $45^\circ$  к переднему краю клетки таким образом, что приманка оказывалась напротив конца пустой веревки. Пять из семи ворон справились с третьей задачей менее чем за 100 проб: для достижения критерия обученности им потребовалось 24, 44, 73, 77 и 79 проб.

Далее с этими пятью воронами провели первый тест на подтягивание приманки при помощи выскальзывающей веревки с ограничителем. Приманку помещали в кормушку, которая была прикреплена к подносу. Через две петли на переднем крае подноса была пропущена веревка, концы которой располагали параллельно друг другу. Рядом с одним из концов был привязан объект (ограничитель), который не давал веревке выскользнуть из петель, но только в том случае, если птица тянула за другой конец веревки. Для уменьшения влияния обучения на результат теста в каждой из 30 тестовых проб использовали новый объект (пуговицы, бусины и т.п.), который размещали на расстоянии 12 см, или 18 см от конца веревки. Ни одна из пяти птиц с этой задачей не справилась — доля выборов “правильного” конца веревки не отличалась ( $p > 0.05$ ) от случайного уровня (50%).

Поэтому далее мы обучали ворон решению этой задачи. Ограничителем служил завязанный на веревке узел. Для достижения критерия обученности (9 успешных проб из 10 последовательных) птицам потребовалось 18, 38, 70, 80, и 95 проб.

Далее повторно провели тест с 30 типами ограничителей. Две вороны справились с этим тестом: доля правильных решений составила 70% ( $n = 30$ ;  $p = 0.08$ ) и 83.3% ( $n = 30$ ;  $p = 0.00003$ ). С остальными тремя птицами работа продолжается в настоящее время.

Важно отметить, что положительный результат в таком тесте не обязательно свидетельствует о понимании структуры этой задачи: птицы

могли обучиться выбирать конец веревки без ограничителя не понимая его роли и не отслеживая перемещение веревки в петлях. Для оценки понимания птицами структуры задачи на подтягивание приманки при помощи выскальзывающей веревки на следующем этапе будет проведен тест с веревкой без ограничителя. Добыть приманку в этой задаче можно только в том случае, если потянуть за оба конца веревки одновременно. Если вороны не справятся с этой задачей, мы обучим их её решению, после чего проведем заключительный тест, в котором параллельно двум концам веревки будет размещена короткая, не связанная с подносом, веревка.

Разработанный нами новый комплекс протоорудийных задач позволит оценить механизм их решения. Он может быть использован для сравнительного исследования наглядно-действенного мышления детей и животных разных видов. Кроме того, он позволит точнее оценить механизм решения задач на кооперацию.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 121032500080-8) и при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Мозг, когнитивные системы, искусственный интеллект».

## Список литературы

- [1] Heinrich B., Bugnyar T., “Testing problem solving in ravens: String-pulling to reach food”, *Ethology*, **111**:10 (2005), 962–976.
- [2] Huber L., Gajdon G. K., “Technical intelligence in animals: The kea model”, *Animal Cognition*, **9**:4 (2006), 295–305.
- [3] Багоцкая М. С., Смирнова А. А., Зорина З. А., “Врановые способны понимать логическую структуру задач на подтягивание закрепленной на нити приманки”, *Журнал высшей нервной деятельности*, **60**:5 (2010), 543–551.
- [4] Taylor A. H., Knaebe B., Gray R. D., “An end to insight? New Caledonian crows can spontaneously solve problems without planning their actions”, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, **279**:1749 (2012), 4977–4981.
- [5] Schmidt G. F., Cook R. G., “Mind the gap: Means-end discrimination by pigeons”, *Animal Behaviour*, **71**:3 (2006), 599–608.
- [6] Obozova T. A., Bagotskaya M. S., Smirnova A. A., Zorina Z. A., “A comparative assessment of birds’ ability to solve string-pulling tasks”, *Biology Bulletin*, **41**:7 (2014), 565–574.
- [7] Ellison A. M., Watson J., Demers E., “Testing problem solving in turkey vultures (*Cathartes aura*) using the string-pulling test”, *Animal Cognition*, **18**:1 (2015), 111–118.
- [8] Miklósi A., Kubinyi E., Topál J., Gácsi M., Virányi Z., Csányi V., “A simple reason for a big difference: Wolves do not look back at humans, but dogs do”, *Current Biology*, **13**:9 (2003), 763–766.

- [9] Smith B. P., Litchfield C. A., “Looking back at ‘looking back’: Operationalising referential gaze for dingoes in an unsolvable task”, *Animal Cognition*, **16**:6 (2013), 961–971.
- [10] Hirata S., Fuwa K., “Chimpanzees (Pan troglodytes) learn to act with other individuals in a cooperative task”, *Primates*, **48**:1 (2007), 13–21.
- [11] Kaigaishi Y., Nakamichi M, Yamada K., “High but not low tolerance populations of Japanese macaques solve a novel cooperative task”, *Primates*, **60**:5 (2019), 421–430.

## Testing cognition in hooded crows using a new type of string-pulling task

Kubenko K.N., Smirnova A.A.

String-pulling tasks are used to study animal cognition. We developed a new type of string-pulling task and studied the ability of hooded crows to understand their logical structure spontaneously and after training.

**Keywords:** tool-use, string-pulling task, understanding cause-and-effect relationships, reasoning, hooded crows

## References

- [1] Heinrich B., Bugnyar T., “Testing problem solving in ravens: String-pulling to reach food”, *Ethology*, **111**:10 (2005), 962–976.
- [2] Huber L., Gajdon G. K., “Technical intelligence in animals: The kea model”, *Animal Cognition*, **9**:4 (2006), 295–305.
- [3] Bagotskaya M. S., Smirnova A. A., Zorina Z. A., “Corvidae are Able to Understand the Logical Structure in String-Pulling Tasks”, *Journal of Higher Nervous Activity*, **60**:5 (2010), 543–551 (In Russian).
- [4] Taylor A. H., Knaebe B., Gray R. D., “An end to insight? New Caledonian crows can spontaneously solve problems without planning their actions”, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, **279**:1749 (2012), 4977–4981.
- [5] Schmidt G. F., Cook R. G., “Mind the gap: Means-end discrimination by pigeons”, *Animal Behaviour*, **71**:3 (2006), 599–608.
- [6] Obozova T. A., Bagotskaya M. S., Smirnova A. A., Zorina Z. A., “A comparative assessment of birds’ ability to solve string-pulling tasks”, *Biology Bulletin*, **41**:7 (2014), 565–574.
- [7] Ellison A. M., Watson J., Demers E., “Testing problem solving in turkey vultures (*Cathartes aura*) using the string-pulling test”, *Animal Cognition*, **18**:1 (2015), 111–118.
- [8] Miklósi A., Kubinyi E., Topál J., Gácsi M., Virányi Z., Csányi V., “A simple reason for a big difference: Wolves do not look back at humans, but dogs do”, *Current Biology*, **13**:9 (2003), 763–766.
- [9] Smith B. P., Litchfield C. A., “Looking back at ‘looking back’: Operationalising referential gaze for dingoes in an unsolvable task”, *Animal Cognition*, **16**:6 (2013), 961–971.

- [10] Hirata S., Fuwa K., “Chimpanzees (*Pan troglodytes*) learn to act with other individuals in a cooperative task”, *Primates*, **48**:1 (2007), 13–21.
- [11] Kaigaishi Y., Nakamichi M, Yamada K., “High but not low tolerance populations of Japanese macaques solve a novel cooperative task”, *Primates*, **60**:5 (2019), 421–430.



# DOGHOUSE: новый метод исследования пространственно-временной динамики активности мозга

А. А. Лазуткин<sup>1</sup>, С. А. Шуваев<sup>2</sup>

Данные, получаемые путём окрашивания и микроскопии целого мозга, анализируют путём автоматического вписывания трехмерных реконструкций в 3D-атлас и обнаружения меченых клеток в отдельных областях. Однако математический аппарат, который позволял бы осуществлять, с одной стороны, точный автоматизированный количественный анализ меченых клеток, а, с другой стороны, позволял бы сопоставлять полученную информацию о числе клеток во всем мозге с его функциональной анатомией, в настоящий момент недостаточно развит. Для решения этой проблемы нами был разработан DOGHOUSE – метод изучения пространственно-временной динамики активности целого мозга. Он состоит из двух компонент. CORGI – алгоритм вписывания образцов мозга в пространстве и их синхронизации во времени, который преодолевает различия между непохожими образцами мозга. DALMATIAN – алгоритм обнаружения клеток в образцах целого мозга, позволяющий автоматически идентифицировать клетки даже в сложных случаях, когда они плотно упакованы относительно друг друга. Наш метод был апробирован на образцах мозга взрослых и развивающихся мышей и показал характеристики, соответствующие или превышающие таковые, получаемые имеющимися аналогами. Предложенный метод автоматизирует такие задачи как сравнение трехмерных образцов мозга групп животных и мониторинг развития мозга. Все компоненты метода находятся в открытом доступе.

**Ключевые слова:** целый мозг, 3D-анализ, динамика развития, микроскопия, вписывание, подсчёт

---

<sup>1</sup>*Лазуткин Александр Алексеевич* — старший научный сотрудник; Институт Высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Московский Государственный Университет им. М.В.Ломоносова, Москва; Центр генетики развития и отдел анестезиологии Университета Стоуни-Брук, Стоуни-Брук, Нью-Йорк, e-mail: lazutkin.a.a@gmail.com.

*Lazutkin Alexander* — senior researcher; Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology RAS, Lomonosov Moscow State University, Moscow; Center for Developmental Genetics and Department of Anesthesiology, Stony Brook University, Stony Brook, NY.

<sup>2</sup>*Шуваев Сергей Алексеевич* — аспирант; Лаборатория Колд-Спринг-Харбор, Колд-Спринг-Харбор, Нью-Йорк.

*Shuvaev Sergey* — postgraduate student; Department of Neuroscience of Cold Spring Harbor Laboratory, Cold Spring Harbor, NY, e-mail: sshuvaev@cshl.edu.

# 1. Введение

Начиная с 2000-х годов началось взрывное развитие технологий трехмерной визуализации несекционированных образцов биологической ткани, в частности, мозга. Главной движущей силой для этого стало появление широкого спектра новых оптических методов, позволяющих снимать крупные образцы с клеточным разрешением [1], и последовавшее за этим развитие новых гистохимических техник: whole-mount иммуногистохимии [2] и оптического просветления [3]. В современной науке идет постоянное совершенствование методов трехмерной визуализации, однако, использование их для картирования активности мозга во время когнитивных задач до сих пор находится в зачаточном состоянии [4],[5]. Такое отставание, главным образом, обусловлено недостаточным развитием математического аппарата, который позволял бы осуществлять, с одной стороны точный автоматизированный количественный анализ активных клеток, а, с другой стороны, позволял бы сопоставлять полученную информацию о числе клеток во всем мозге с его функциональной анатомией. В этой связи нами была поставлена задача разработки технологии трехмерного имиджинга и анализа мозга животных и создание метода псевдо-4D-визуализации динамических процессов в мозге. Разрабатываемая нами технология включает в себя несколько этапов от пробоподготовки и получения трехмерных изображений до перевода их в математические данные. Последнее требует выполнения целого ряда алгебраических процедур: оптимизация трехмерных изображений, их эквализация, совмещение изображений мозга и регистрация их в трехмерный атлас мозга, и, наконец, количественный анализ. В настоящей работе мы обобщаем наши наработки для решения этих задач, которые мы объединили под названием DOGHOUSE. Он состоит из двух компонент. CORGI (Customizable Object Registration for Groups of Images) – алгоритм вписывания образцов мозга в пространстве и их синхронизации во времени, который преодолевает различия между непохожими образцами мозга [6]. DALMATIAN (Dependable Algorithm for Matrix Image Analysis) – алгоритм обнаружения клеток в образцах целого мозга, позволяющий автоматически идентифицировать клетки даже в сложных случаях, когда они плотно упакованы относительно друг друга [7].

## 2. CORGI: совмещение непохожих образцов мозга в пространстве и времени с высокой точностью

Для выполнения задачи сравнения трехмерных изображений мозга на основе плотностей сигнала в целом мозге необходимо, чтобы локализация морфологически идентичных структур в изображениях разных об-

разцов совпадала. Это достижимо при помощи метода математического совмещения объемных изображений, называемого в литературе методом регистрации. Не все существующие на сегодня методы регистрации обладают достаточной точностью совмещения образцов. Мы выявили следующие основные причины возникновения данных неточностей для образцов взрослого мозга: большая вариативность обонятельных луковиц и ошибочное математическое совмещение границы боковых желудочков и внутренней выстилки желудочков мозга. При совмещении образцов развивающегося мозга наблюдается еще большее число проблем. Во-первых, мозг в процессе развития претерпевает существенные деформации за малое время. Таким образом, успешный алгоритм вписывания образцов детского мозга должен быть способен преодолевать ярко выраженные различия между образцами мозга на разных стадиях развития. Во-вторых, для определённых моментов в развитии мозга может быть доподлинно неизвестно, что именно является стандартом, а что – отклонением, так как атласы развития мозга фокусируются лишь на небольшом числе определённых этапов развития. Как следствие, успешный метод вписывания образцов детского мозга должен балансировать между точностью вписывания и сохранением исходных данных. В-третьих, развитие мозга протекает с индивидуальными различиями в скорости. С целью сохранения детальной информации путём предотвращения усреднения образцов мозга на разных стадиях развития, метод совмещения образцов мозга должен быть дополнен механизмом синхронизации образцов мозга во времени. С целью решения данных задач в предложенном протоколе были применены: i) предварительная фильтрация изображений, включающая выявление контуров областей мозга и двоичной маски образцов для более точного совмещения областей мозга; ii) поиск преобразования мозга с помощью алгоритма симуляции закалки (Монте-Карло) на итерационно уточняемой координатной сетке, позволивший совмещать области непохожих образов мозга сохраняя сходимость алгоритма; iii) регуляризацию преобразования путём учёта деформационной энергии преобразования для максимального сохранения исходной информации об образце и iv) синхронизацию образцов путём классического многомерного шкалирования на основе корреляций между образцами. Метод был апробирован на 28 образцах развивающегося мозга, где было проведено сравнение качества совмещения нашего метода и существующих методов (iDISCO и CUBIC). CORGI и CUBIC проявили себя наилучшим образом в пространственном вписывании образов; CORGI потребовал в 32 раза меньше вычислений. Отмечено, что CORGI проявил себя лучше, чем CUBIC в совмещении мозжечка; обратная тенденция наблюдалась в совмещении роstralного миграционного пути. Оба алгоритма проявили себя лучше iDISCO, а также лучше CUBIC при

числе итераций как у CORGI. Наш алгоритм, таким образом, успешно проявил себя в совмещении образцов развивающегося мозга. Предложенный метод является модульным; его отдельные части (фильтрация изображений, Монте-Карло, совмещение во времени) могут использоваться как отдельно, так и вместе с другими существующими алгоритмами.

### **3. DALMATIAN: обнаружение и подсчет близко-расположенных клеток**

Во время работы над количественным анализом в трехмерных образцах мозга нами были выявлены типовые трудности автоматического обнаружения меченых клеток в образцах ткани. А именно: i) различия между отдельными образцами, включая различия в морфологии, а также в интенсивности сигнала и фона; ii) неспецифическая флюоресценция, в т.ч. флюоресценция кровеносных сосудов и ткани; iii) неоднородность метки, маркирующей клетки – типичная проблема для делящихся клеток; iv) неоднородность фона и v) плотно упакованные клетки – проблема, также типичная для делящихся клеток и клеток сетчатки глаза. В разработанном нами алгоритме мы использовали: i) выравнивание изображений по гистограмме для устранения различий между отдельными образцами; ii) вычитания изображений, снятых на разной длине волны для устранения неспецифической флюоресценции; iii) низкочастотный фильтр против неоднородности метки и iv) высокочастотный фильтр против неоднородности фона, а также v) алгоритм водораздела для выявления потенциальных клеток и бутстреп для фильтрации потенциальных клеток по размеру. Мы протестировали наш алгоритм на гистологических срезах ткани с клетками, маркированными с помощью EdU, BrdU, c-Fos, DAPI, а также в образцах целых гиппокампов с клетками, маркированными с помощью EdU, Nestin-CFP, где мы провели сравнение точности обнаружения клеток нашим алгоритмом и существующими алгоритмами (включённым в пакеты Imaris и ImageJ FIJI). Во всех тестах DALMATIAN показал лучший результат в обнаружении меченых клеток; результат (f-мера) зависел только от соотношения сигнал-шум в образцах и не менялся в зависимости от факторов, идентифицированных нами как проблематичные при автоматическом подсчёте клеток. Таким образом, DALMATIAN успешно проявил себя в обнаружении меченых клеток, включая плотно упакованные делящиеся клетки.

Таким образом, разработанный нами метод DOGHOUSE был апробирован на образцах мозга взрослых и развивающихся мышей и показал характеристики, соответствующие или превышающие имеющиеся на тестовых выборках данных. Предложенный метод автоматизирует такие

задачи как сравнение групп животных и мониторинг развития мозга. Все компоненты метода находятся в открытом доступе [8],[9].

*Исследование выполнено при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Мозг, когнитивные системы, искусственный интеллект» и грантов РФФИ №19-15-00247, РФФИ №19-29-04173 и Министерства науки и образования РФ №075-15-2020-801.*

## Список литературы

- [1] Power R.M., Huisken J., “A guide to light-sheet fluorescence microscopy for multiscale imaging”, *Nature Methods*, **14**:4 (2017), 360-373.
- [2] Renier N. et al., “iDISCO: a simple, rapid method to immunolabel large tissue samples for volume imaging”, *Cell*, **159** (2014), 896-910.
- [3] Jährling N. et al., “Light-Sheet Fluorescence Microscopy: Chemical Clearing and Labeling Protocols for Ultramicroscopy”, *Methods in Molecular Biology*, **1563** (2017), 33-49.
- [4] Murakami T.C. et al., “A Three-dimensional single-cell-resolution whole-brain atlas using CUBIC-X expansion microscopy and tissue clearing”, *Nature Neuroscience*, **21** (2018), 625-637.
- [5] Renier N. et al., “Mapping of Brain Activity by Automated Volume Analysis of Immediate Early Genes”, *Cell*, **165** (2016), 1789-1802.
- [6] Shuvaev S.A., et al., “Spatiotemporal 3D image registration for mesoscale studies of brain development”, *Scientific Reports*, 2022, в печати.
- [7] Shuvaev S.A., et al., “DALMATIAN: An algorithm for automatic cell detection and counting in 3D”, *Frontiers in Neuroanatomy*, **11** (2007), 117.
- [8] <https://github.com/KoulakovLab/Registration>
- [9] <https://github.com/KoulakovLab/Dalmatian>

## **DOGHOUSE: a new assay to probe spatiotemporal dynamics of brain-wide activity**

**Lazutkin A.A., Shuvaev S.A.**

To analyze the data generated with whole-brain staining and imaging approaches, several assays have been proposed registering brain samples to atlases and detecting stained cells in individual brain regions. However, the algorithms for quantifying labeled cells in the brain and grounding these counts to the brain’s functional anatomy are still in the early stages of development. To bridge this gap, we introduce DOGHOUSE, an end-to-end assay for probing spatiotemporal dynamics of brain-wide activity. The assay consists of two components. CORGI, a software package for registering whole-brain sample data in space and time, overcomes the differences

between dissimilar perinatal brains. DALMATIAN, a software package for cell detection in whole-brain sample data, separates densely packed dividing cells. The staining protocol has been validated for the staining specificity whilst the software packages have shown competitive performance meeting or exceeding the state-of-the-art on diverse datasets. Our assay automates a variety of tasks including group comparison and monitoring brain development dynamics. All methods are available for download via open access.

*Keywords:* whole-brain, 3D-analysis, developmental dynamics, microscopy, registration, morphing, cell counting

## References

- [1] Power R.M., Huisken J., “A guide to light-sheet fluorescence microscopy for multiscale imaging”, *Nature Methods*, **14**:4 (2017), 360-373.
- [2] Renier N. et al., “iDISCO: a simple, rapid method to immunolabel large tissue samples for volume imaging”, *Cell*, **159** (2014), 896–910.
- [3] Jährling N. et al., “Light-Sheet Fluorescence Microscopy: Chemical Clearing and Labeling Protocols for Ultramicroscopy”, *Methods in Molecular Biology*, **1563** (2017), 33–49.
- [4] Murakami T.C. et al., “A Three-dimensional single-cell-resolution whole-brain atlas using CUBIC-X expansion microscopy and tissue clearing”, *Nature Neuroscience*, **21** (2018), 625–637.
- [5] Renier N. et al., “Mapping of Brain Activity by Automated Volume Analysis of Immediate Early Genes”, *Cell*, **165** (2016), 1789–1802.
- [6] Shuvaev S.A., et al., “Spatiotemporal 3D image registration for mesoscale studies of brain development”, *Scientific Reports*, 2022, in press.
- [7] Shuvaev S.A., et al., “DALMATIAN: An algorithm for automatic cell detection and counting in 3D”, *Frontiers in Neuroanatomy*, **11** (2007), 117.
- [8] <https://github.com/KoulakovLab/Registration>
- [9] <https://github.com/KoulakovLab/Dalmatian>

# Нейроморфные системы искусственного интеллекта

Д. А. Ларионов<sup>1</sup>, Д. А. Иванов<sup>2</sup>, М. В. Киселев<sup>3</sup>

Современные системы искусственного интеллекта (ИИ), построенные на базе архитектуры фон Неймана, имеют ряд фундаментальных ограничений в сравнении с мозгом. В исследовании мы частично раскрыли эти ограничения, предложили принцип классификации нейроморфных систем ИИ и представили сравнительный анализ популярных нейроморфных проектов в разрезе предложенной классификации.

**Ключевые слова:** Искусственный интеллект, нейроморфные системы, локальное обучение, импульсные нейронные сети, разреженные вычисления, вычисления в памяти, аналоговые вычисления.

## 1. Введение

Под классическими компьютерами понимается аппаратная реализация архитектуры фон Неймана. Она предполагает, что все вычисления представляются в виде программ, являющихся последовательностями машинных команд. Команды выполняет процессор (в большинстве процессоров имеется несколько относительно независимо работающих вычислительных ядер). Команды и данные хранятся в общей памяти.

Узким местом такой архитектуры является ограниченная пропускная способность шины данных между памятью и процессором. Шина данных нагружается главным образом за счет передачи промежуточных данных вычислений, которыми обмениваются ядра через оперативную память в процессе выполнения программы.

Вычисляя выходное значение персептрона на компьютере фон Неймана, необходимо выполнить столько операций чтения из памяти зна-

---

<sup>1</sup> *Ларионов Денис Александрович* — ЧУ Цифрум, Росатом, Руководитель отдела искусственного интеллекта, e-mail: denis.larionov@gmail.com

Larionov Denis Aleksandrovich — PI Cifrum, Rosatom, Head of Artificial Intelligence Department

<sup>2</sup> *Иванов Дмитрий Александрович* — ЧУ Цифрум, Росатом, Эксперт группы нейроморфных вычислений, Аспирант ВМК МГУ,

Ivanov Dmitry Alexandrovich — PI Cifrum, Rosatom, Expert of the Neuromorphic Computing Group, Postgraduate student of the CMC MSU

<sup>3</sup> *Киселев Михаил Витальевич* — Чувашский Государственный Университет, Руководитель лаборатории нейроморфных вычислений, Кандидат технических наук,

Kiselev Mikhail Vitalievich — Chuvash State University, Head of the Laboratory of Neuromorphic Computing, Candidate of Technical Sciences

чений сигнала и веса, сколько нейрон имеет входных связей (синапсов). Прodelать это необходимо для каждого нейрона в сети, а в задаче обучения с учителем еще и для каждого примера обучающей выборки.

Трендом настоящего времени является увеличение размеров нейросетевых моделей в два раза каждые 3-4 месяца [1]. Проблема энергоэффективности выходит на первый план и становится фундаментальным ограничением развития современных систем ИИ.

В работе [2] показано, что на протяжении всей истории ИИ выигрывали те подходы и алгоритмы, для которых существовала подходящая аппаратная платформа (железо). Поэтому мы считаем важным рассматривать алгоритмы ИИ в совокупности с аппаратной составляющей, на которой они исполняются. Аппаратное обеспечение и алгоритмы вместе составляют системы ИИ. Именно аппаратная платформа определяет доступность и эффективность того или иного алгоритма.

Одним из очевидных направлений развития систем ИИ является нейроморфность, т.е. использование принципов организации и функционирования мозга в вычислительных системах.

Мозг является примером принципиально другой, не фон Неймановской, вычислительной машины, функционирующей как нейронная сеть. В отличие от классических компьютеров, в мозге:

- Нейроны обмениваются одинаковыми дискретными импульсами, кодирующими информацию
- Не обнаружено единого сигнала, синхронизирующего работу всех нейронов
- Процессы обучения локальны, а топологии сетей непослойны
- Все события происходят асинхронно, нет общей памяти, с которой работают универсальные вычислители, вместо этого - самоорганизующееся функционирование огромного числа простых агентов

Сегодня нейроморфными системами ИИ для привлечения внимания называют даже сверточные сети, не говоря уже об альтернативных аппаратных реализациях, вроде ASIC. Мы предлагаем перечень нейроморфных свойств, полезных в создании вычислительных систем и проявивших себя в реально существующих проектах.

- Нейронные сети - возможность обучения на данных, интеллект за счет большого числа агентов



- Параллелизм и асинхронность - одновременное выполнение разных задач, нет единого синхронизирующего процесса, нет единого таймера
- Импульсный характер передачи информации - минимальные затраты на передачу сигнала и его обработку на принимающем нейроне, устойчивость к шуму
- Локальное обучение - меньшие издержки на операции переноса данных при обучении, возможность создания неограниченно больших систем, непрерывность и инкрементальность обучения
- Разреженность потоков данных - событийная обработка сигналов, меньшие издержки на операции переноса и обработки данных
- Аналоговость - эффективная аппаратная реализация, миниатюризация, использование трехмерных вычислительных структур
- Вычисления в памяти - нет издержек на перенос промежуточных данных вычислений, нет конкурентного доступа к памяти

Нашей группой был проведен сравнительный анализ нейроморфных процессоров представленных в публичном пространстве на конец 2021 года.

## Выводы

Большинство проектов позволяют исполнять сети только в режиме применения (inference). Локальное обучение на чипе реализовано только в Loihi и с недавнего времени в BrainScaleS, но даже для этих чипов подавляющее большинство примеров используют градиентные методы обучения, а не локальные. В примерах же где используются локальные методы всегда присутствуют какие-то дополнительные архитектурные приемы. Научный прорыв этой области еще не совершен.

Заметен тренд на гибридные архитектуры, позволяющие передавать в рамках спайка не просто факт его наличия, а численное значение (это уход в сторону от мимикрирования мозга). В Tianjic и Neuroflow эта возможность появилась сразу, в SpiNNaker и BrainScaleS она добавлена во вторых поколениях, более того, скоро такая возможность появится в Loihi

Другой заметный тренд - гибридизация в части одновременного исполнения как классических (ANN) так и спайковых (SNN) нейросетей одним чипом. Tianjic, NeuronFlow, а за ними и SpiNNaker, BrainScaleS - позволяют работать не только со спайковыми сетями.

Рис. 1. Результаты

Чип / нейромкомпьютер	Вычисления в памяти	Представление информации	Обучение на устройстве	Аналоговость	Событийность	Техпроцесс (нм)	Энергопотребление	Особенности
CPU / GPU / TPU	нет	числа, импульсы	Backprop / STDP	нет	нет	5	Google Edge TPU: 2 Tops/watt	высокая популярность, богатая экосистема, продвинутые инженерные технологии
TrueNorth	рядом с памятью	импульсы	нет	нет	да	28	400 GOPS/watt 25 pJ/operation	первый нейроморфный чип без обучения (IBM)
Loihi	рядом с памятью	импульсы	STDP	нет	да	14	80 pJ/operation	первый нейроморфный чип с обучением (Intel)
Tianjic	рядом с памятью	числа, импульсы	нет	нет	да	28	1278 MACGOPs/watt 649 GSOPS/watt	гибридный чип с эффективной поддержкой как SNN так и ANN, энергоэффективность
Spinnaker	рядом с памятью	импульсы, числа	STDP	нет	нет	22	20 pJ/operation	масштабируемая вычислительная платформа оптимизированная для выполнения SNN и rate based DNN
BrainScaleS	да	импульсы, числа	STDP, Surrogate gradient	мембранный потенциал	да	65	10 pJ/synaptic event 200 mW - total	аналоговые нейроны на RC контурах, большой размер
GrAIOne	рядом с памятью	числа, импульсы	нет	нет	да	28	20 pJ/operation 10 pJ/operation	архитектура NeuronFlow, эффективная поддержка разреженных вычислений, поддержка ANN и SNN
Eyeriss	рядом с памятью	числа	нет	нет	нет	65	278 mW	ускоритель DCNN за счет пространственной разреженности данных
Алтай	рядом с памятью	импульсы	нет	нет	да	28	500 mW	первый отечественный нейроморфный чип без обучения, масштабируется

Несмотря на то, что проекты, использующие аналоговые нейроны выглядят более нейроморфными, большее распространение получают цифровые реализации нейронов.

## Заключение

Подводя итоги данного аналитического обзора, можно сделать вывод, что в данный момент мы наблюдаем революционные изменения в сфере вычислительной электроники. В этом нет преувеличения - впервые за всю компьютерную эпоху созданы и уже находят практические применения не фон Неймановские вычислители. При этом уже сейчас ясно, что применение нейропроцессоров и нейромкомпьютеров может быть существенно шире области моделирования нейросетей. Перспективными областями их применения являются NP-полные задачи, многопараметрическая оптимизация при наличии множественных ограничений.

Очевидно также, что подход к использованию таких вычислительных систем будет в корне отличаться от привычного нам программирования. Вместо него будет обучение, самоорганизация, оптимальное конфигурирование взаимодействия множества агентов и другие подходы, которые еще только предстоит развить. И, кроме того, с точки зрения проблемы построения “сильного” интеллекта, нейроморфному подходу в настоящее время не видно альтернатив.

## Список литературы

- [1] <https://openai.com/blog/ai-and-compute/>.
- [2] Hooker S, “The hardware lottery”, *//arXiv preprint arXiv:2009.06489*, 2020.

### **Neuromorphic artificial intelligence systems**

**Larionov D.A., Ivanov D.A., Kiselev M.V.**

Modern artificial intelligence (AI) systems based on the von Neumann architecture have a number of fundamental limitations compared to the brain. In the paper, we partially revealed these limitations, proposed the principle of classification of AI neuromorphic systems and presented a comparative analysis of popular neuromorphic projects in the context of the proposed classification.

*Keywords:* Artificial intelligence, neuromorphic systems, local learning, spiking neural networks, sparse computing, in-memory computing, analog computing.

## References

- [1] <https://openai.com/blog/ai-and-compute/>.
- [2] Hooker S, “The hardware lottery”, *//arXiv preprint arXiv:2009.06489*, 2020.

# Кодирование пространства и объектов в гиппокампе: роль новизны и значимости объектов в формировании когнитивной специализации нейронов

В. В. Плюснин<sup>1</sup>, К. А. Торопова<sup>2</sup>, О. И. Ивашкина<sup>3</sup>, К. В. Анохин<sup>4</sup>

Изучение нейрональных основ кодирования пространства и объектов относится к числу актуальных направлений нейрофизиологии. Данная работа была направлена на изучение вклада значимости и новизны объектов в формирование когнитивной специализации нейронов гиппокампа мышей. Кроме того, с помощью прижизненного кальциевого имиджинга проводилось исследование соотношения между клеточными репрезентациями индивидуально и социально приобретенной памяти.

**Ключевые слова:** нейрональное кодирование, кальциевый имиджинг, распознавание объектов, социальная передача вкусового предпочтения, CA1, гиппокамп.

Кодирование информации об окружающей среде традиционно находится в центре внимания когнитивных наук. Нейрофизиологические исследования показывают, что при знакомстве животного с окружающим пространством и объектами активность нейронов изменяется как на сетевом уровне, так и на уровне отдельных нейронов, что проявляется в

---

<sup>1</sup> *Плюснин Виктор Владимирович* — лаб.-исследователь, НИЦ «Курчатовский Институт», Институт перспективных исследований мозга МГУ им. М.В. Ломоносова, e-mail: witkax@gmail.com.

Plusnin Viktor Vladimirovich — Research Assistant, NRC «Kurchatov Institute, Institute of Advanced Brain Studies of Lomonosov MSU

<sup>2</sup> *Торопова Ксения Александровна* — м.н.с., НИЦ «Курчатовский Институт», Институт перспективных исследований мозга МГУ им. М.В. Ломоносова, e-mail: xen.alexander@gmail.com.

Toropova Ksenia Aleksandrovna — Junior Researcher, NRC «Kurchatov Institute, Institute of Advanced Brain Studies of Lomonosov MSU

<sup>3</sup> *Ивашкина Ольга Игоревна* — м.н.с., НИЦ «Курчатовский Институт», Институт перспективных исследований мозга МГУ им. М.В. Ломоносова, e-mail: oivashkina@gmail.com.

Ivashkina Olga Igorevna — Junior Researcher, NRC «Kurchatov Institute, Institute of Advanced Brain Studies of Lomonosov MSU

<sup>4</sup> *Анохин Константин Владимирович* — дир., академ. РАН, проф., д.м.н., Институт перспективных исследований мозга МГУ им. М.В. Ломоносов, e-mail: k.anokhin@gmail.com.

Anokhin Konstantin Vladimirovich — Director of Institute of Advanced Brain Studies of Lomonosov MSU, Academician of Russian Academy of Sciences, Professor, Doctor of Sciences in Medicine

специализации нейронов относительно этих аспектов среды [1, 2]. Значительный объем научных исследований посвящен изучению нейрональных основ кодирования пространства, а также положения и типов объектов [3, 4]. Однако остается неясным как влияет степень новизны и значимость объектов на когнитивную специализацию нейронов относительно пространства и объектов. Целью данной работы является сравнительное исследование кодирования объектов и пространства нейронами гиппокампа мыши, а также изучение влияния новизны объектов, значимости объектов и способа приобретения памяти об объектах на формирование когнитивных специализаций нейронов гиппокампа.

В работе был применен подход, сочетающий оптическую кальциевую визуализацию нейрональной активности и оценку поведения животных при выполнении ими задачи распознавания новых объектов. Задача распознавания новых объектов состояла из двух сессий: в первой сессии животному предъявляли два одинаковых новых объекта, во второй – один из двух знакомых объектов заменяли на новый объект, расположенный в том же месте, но не знакомый прежде животному. Для изучения влияния значимости объектов на формировании когнитивных специализаций нейронов мыши были разделены на 2 группы: в первой группе мышам предъявляли нейтральные объекты, куб и пирамиду, различавшиеся по цвету и тактильным свойствам, во второй группе мышам предъявляли значимые объекты – банки с молотым кормом, ароматизированным запахами корицы или какао. Кроме того, в случае значимых объектов животные последовательно учились распознавать кормушки с разными запахами индивидуально, а затем были обучены в задаче социальной передачи вкусового предпочтения. В этой модели сессия обучения состояла из взаимодействия наивной мыши-наблюдателя с мышью-демонстратором, которой непосредственно перед взаимодействием предъявляли две кормушки с ароматизированным кормом. В ходе сессии обучения мышь-наблюдатель могла свободно взаимодействовать с мышью-демонстратором, получая информацию о том, каким кормом питалось животное-демонстратор.

Для регистрации активности нейронов гиппокампа был применен метод кальциевого имиджинга с использованием миниатюрного микроскопа NVista HD [5]. В экспериментах использовали взрослых самок и самцов мышей линии C57Bl/6 в возрасте 2-5 месяцев. Флуоресцентный кальциевый сенсор GCaMP6s доставляли в мозг мышей посредством микроинъекций частиц аденоассоциированного вируса, кодирующих GCaMP6s под промотором CAG, в поле CA1 гиппокампа. Регистрацию кальциевых ответов нейронов гиппокампа проводили во всех сессиях распознавания новых объектов. Этапы обработки включали коррекцию движений, нормализацию сигнала, выделение клеточных компонент методом

главных/независимых компонент (PCA/ICA) и их очистку от артефактов, выделение сигнала с коррекцией на засветки и детекцию значимых кальциевых событий. Одновременно с прижизненным имиджингом проводили видеорегистрацию поведения мышей. Для регистрации и анализа поведения животных был разработан алгоритм в среде визуального программирования Bonsai, позволяющий определить траекторию передвижения животного.

Был отработан протокол регистрации кальциевой активности нейронов гиппокампа мышей в свободном поведении с помощью минискапа NVista HD, а также разработаны методы обработки кальциевой активности, которые позволяют идентифицировать конкретные местоположения нейронов и временные ряды их активности. Также был разработан алгоритм видеотрекинга животных в визуальной среде программирования Bonsai, позволяющий достоверно определять положение животных в экспериментальной клетке. Дополнительно был разработан комплекс программных инструментов в среде MATLAB и Python для обеспечения синхронизации, анализа и визуализации полученных данных. Успешно проведена долгосрочная (до 2 недель) регистрация кальциевой активности нейронов поля CA1 гиппокампа методом минимикроскопии при выполнении мышами различных поведенческих задач.

Кальциевый сигнал был извлечен у 8 мышей (4 мыши в группе нейтральных объектов и 4 мыши в группе значимых объектов), однако одна мышь из каждой группы была исключена из дальнейшего анализа ввиду слабого сигнала. Суммарно было выделено более 900 нейронов (с не менее  $n = 3$  кальциевыми событиями), более 700 нейронов имели поля, удовлетворяющие критериям пространственной информативности, для этих полей были определены специализации по отношению к пространству и объектам. Для каждой мыши были построены распределения полей места и объектов в пространстве (когнитивные карты).

Во время сессии обучения мыши исследовали два незнакомых одинаковых объекта и не показали различий в предпочтении к одному из объектов по времени обследования в обеих группах. Во время сессии тестирования в группе распознавания значимых объектов мыши проявляли предпочтение в обследовании к новому объекту, в то время как в группе распознавания нейтральных объектов предпочтений в обследовании к новому объекту не было обнаружено. Таким образом, наши результаты показывают, что значимость объектов играет важную роль в формировании памяти распознавания.

Было показано, что во время сессии обучения когнитивные карты равномерно распределены по пространству клетки, за исключением областей, в которых находились объекты. В данных областях была обнаружена повышенная концентрация полей места как в случае предъявления

нейтральных объектов, так и при предъявлении объектов значимых. Мы показали, что характер распределения плотности полей места сохраняется в сессии тестирования и не зависит от степени новизны значимых объектов, при этом плотность полей места оказалась выше вблизи значимых объектов, в сравнении с объектами нейтральными.

В модели социальной передачи вкусового предпочтения было показано, что необходимые для формирования социальной памяти акты взаимодействия с демонстратором отражаются в нейрональной активности гиппокампа животного-наблюдателя. Специализации нейронов относительно вкуса и запаха пищи как нового контрольного, так и знакомого целевого, проявляются в сессиях извлечения социально и индивидуально приобретенной памяти. Однако непосредственно предпочтение в выборе знакомого или незнакомого корма различается от типа опыта, что говорит о включении других структур мозга в принятие решений о выборе корма.

Было показано, что плотность полей места выше вблизи как значимых, так и вблизи нейтральных объектов, при этом плотность полей места оказалась выше вблизи значимых объектов, в сравнении с объектами нейтральными. Было обнаружено, что характер распределения плотности полей места сохраняется в сессии тестирования и не зависит от степени новизны объектов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 20-15-00283 (изучение активности нейронов при распознавании значимых объектов), а также при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Мозг, когнитивные системы, искусственный интеллект» (изучение активности нейронов при распознавании нейтральных объектов).

## Список литературы

- [1] O'Keefe J., "Place units in the hippocampus of the freely moving rat", *Experimental neurology*, **51**:1 (1976), 78–109.
- [2] Швырков В.Б., *Введение в объективную психологию. Нейрональные основы психики.*, Институт психологии РАН, М., 1995, 162 с.
- [3] Dumont J.R., Taube J.S., "The neural correlates of navigation beyond the hippocampus", *Progress in brain research*, **219** (2015), 83–102
- [4] Нøydalm Ø.A., Skytøen E.R., Andersson S.O., Moser M.B., Moser E.I., "Object-vector coding in the medial entorhinal cortex", *Nature*, **568**:7752 (2019), 400–404

- [5] Ghosh K.K., Burns L.D., Cocker E.D., Nimmerjahn A., Ziv Y., El Gamal A., Schnitzer M.J., “Miniaturized integration of a fluorescence microscope”, *Nature methods*, **8**:10 (2011), 871–878

**Encoding of objects and space in hippocampus: the role of novelty and value of objects for cognitive specialization**  
**Plusnin V.V., Toropova K.A., Ivashkina O.I., Anokhin K.V.**

Cellular mechanisms of neural code for information about the environment are one of the topical areas of neurophysiology. The work is aimed at studying the influence of the value and novelty of objects to the cognitive specialization of neurons in the hippocampus of mice. In this work, a comparative study of the relationship between cellular representations of individually and socially acquired memories was investigated using the methods of optical calcium imaging.

*Keywords:* neuronal encoding, calcium imaging, object recognition, social memory, CA1, hippocampus.

## References

- [1] O’Keefe J., “Place units in the hippocampus of the freely moving rat”, *Experimental neurology*, **51**:1 (1976), 78–109
- [2] Shvyrkov V.B., *Introduction to objective psychology. Neuronal foundations of the psyche*, Institute of Psychology of Russian Academy of Sciences, Moscow, 1995 (In Russian), 162 pp.
- [3] Dumont J.R., Taube J.S., “The neural correlates of navigation beyond the hippocampus”, *Progress in brain research*, **219** (2015), 83–102
- [4] Hydalm Ø.A., Skytøen E.R., Andersson S.O., Moser M.B., Moser E.I., “Object-vector coding in the medial entorhinal cortex”, *Nature*, **568**:7752 (2019), 400–404
- [5] Ghosh K.K., Burns L.D., Cocker E.D., Nimmerjahn A., Ziv Y., El Gamal A., Schnitzer M.J., “Miniaturized integration of a fluorescence microscope”, *Nature methods*, **8**:10 (2011), 871–878



# Извлечение коллективных переменных из многомерной нейронной активности клеток места

Н. А. Поспелов<sup>1</sup>, В. П. Сотсков<sup>2</sup>, К. В. Анохин<sup>3</sup>, С. К. Нечаев<sup>4</sup>,  
А. С. Горский<sup>5</sup>

Мы исследовали коллективную активность нейронов места поля CA1 гиппокампа мыши при свободном исследовании среды. С помощью методов нелинейного понижения размерности мы показали, что активность популяции из нескольких сотен клеток может быть сведена к двум коллективным переменным, которые определяют положение животного на исследуемом ей треке. Наши результаты свидетельствуют в пользу гипотезы распределенного кодирования и могут быть использованы для анализа коллективной активности нейронов в других областях мозга.

**Ключевые слова:** нейроны места, понижение размерности, распределенное кодирование

Большой интерес для нейронауки представляет собой изучение активности нейронных ансамблей на популяционном уровне. Главной целью такого анализа является выделение «коллективных» переменных, из набора которых и складывается активность сети. Количество физически значимых коллективных переменных обычно невелико, поэтому для их выделения используется понижение размерности входных данных. Редукция размерности проводится с целью извлечения новых признаков, которые позволяют более емко описать данные и вложить их в наиболее полезное и информативное подпространство.

В последние годы появляется все больше работ, использующих концепцию т.н. «нейронных мод» ([1]). Активность многих нейронов может

---

<sup>1</sup> *Поспелов Никита Андреевич* — ИПИМ МГУ, инженер-исследователь, e-mail: nikpos@yandex.ru.

Pospelov Nikita Andreevich — IPIM MSU, Research Engineer.

<sup>2</sup> *Сотсков Владимир Павлович* — ИПИМ МГУ, лаборант-исследователь, e-mail: vsotskov@list.ru.

Sotskov Vladimir Pavlovich — IPIM MSU, research assistant.

<sup>3</sup> *Анохин Константин Владимирович* — ИПИМ МГУ, директор, e-mail: k.anokhin@gmail.com.

Anokhin Konstantin Vladimirovich — IPIM MSU, Director.

<sup>4</sup> *Нечаев Сергей Константинович* — лаборатория Понселе, НМУ, директор, e-mail: sergey.nechaev@gmail.com.

Sergey Konstantinovich Nechaev — Poncelet Laboratory, HIM, Director.

<sup>5</sup> *Горский Александр Сергеевич* — ИППИ РАН, ведущий научный сотрудник, e-mail: shuragor@mail.ru.

Gorsky Alexander Sergeevich — IPPI RAS, Leading Researcher.

быть описана в терминах  $N$ -мерного нейронного «пространства состояний», где каждая координата (как правило) отвечает за активность отдельной клетки. В экспериментах было показано, что реальная активность популяции нейронов занимает лишь малую часть такого «пространства состояний» ([2], [3], [4]), образуя низкоразмерное многообразие, структура которого определяется функциями регистрируемого нейронного ансамбля.

В качестве объекта исследования были выбраны нейроны места поля CA1 гиппокампа мыши, которые отвечают за кодирование ее пространственного местоположения. В ходе эксперимента мышь свободно перемещалась по среде, ее координаты и поведение фиксировались с помощью видеотрекинга. Эксперимент проводился для сред двух типов:

- 1) Простой кольцевой трек;
- 2) Круглая арена с 3 запрещенными зонами

Целью данной работы было получить информацию о поведении исследуемого организма только из структуры активности нейронов места. Для этого использовались нелинейные методы понижения размерности данных, в частности, метод *laplacian eigenmaps* ([5]), *diffusion maps*, УМАР и другие.

Основным результатом понижения размерности стало то, что в новом пространстве первые две координаты получили смысл координат мыши в физической среде, которую она исследовала (с точностью до поворота на фиксированный угол). Важно отметить, что при этом алгоритм не получал на вход никакой информации о реальном положении мыши. Таким образом, совпадение первых двух координат нового пространства с настоящим положением животного объясняется сходством векторов нейронной активности, считываемой в разное время, но в одном и том же месте исследуемого трека.

Нами была построена мера схожести распределения точек в низкоразмерном пространстве с настоящим распределением точек траектории животного. Выяснилось, что по мере обучения мыши в новой для нее среде обитания улучшается соответствие низкоразмерного представления активности клеток места и реальной траектории.

Наши результаты не могут быть воспроизведены с помощью линейных методов понижения размерности, таких как метод главных компонент (РСА) и, таким образом, найденные нами коллективные переменные не могут являться линейной комбинацией активности подмножества рассматриваемых клеток. Это свидетельствует в пользу гипотезы популяционного кодирования: помимо функциональной специализации отдельных нейронов мы видим наличие распределенного кодирования

информации популяцией клеток места гиппокампа. Закодированная информация, таким образом, может быть извлечена с помощью нелинейного понижения размерности.

Данная работа важна для понимания принципов внутреннего кодирования информации в гиппокампе. Исследование пространства нейронных состояний важно для восстановления «внутренней репрезентации» мозгом внешних стимулов.

## Список литературы

- [1] Gallego J. A., Perich M. G., Naufel S. N. et al., “Cortical population activity within a preserved neural manifold underlies multiple motor behaviors”, *Nat Commun*, 2018, № 9, 4233.
- [2] Gallego J. A., Perich M. G., Miller L. E., Solla S. A., “Neural manifolds for the control of movement”, *Neuron*, 2017, № 94, 978–984.
- [3] Sadtler P. T. et al., “Neural constraints on learning”, *Nature*, 2014, № 512, 423–426.
- [4] Yu B. M. et al., “Gaussian-process factor analysis for low-dimensional single-trial analysis of neural population activity”, *Neurophysiology*, 2009, № 102, 614–635.
- [5] Belkin M., Niyogi P., “Laplacian eigenmaps for dimensionality reduction and data representation”, *Neural computation*, **15**:6 (2003), pp. 1373–139.

## Extracting collective variables from multivariate neural activity of place cells

Pospelov N.A., Sotskov V.P., Anokhin K.V., Nechaev S.K., Gorsky A.S.

We investigated the collective activity of the CA1 place field neurons of the mouse hippocampus during free exploration task. Using methods of nonlinear dimensionality reduction, we showed that the activity of a population of several hundred cells can be reduced to two collective variables that determine the position of the animal on the explored environment. Our results support the distributed coding hypothesis and can be used to analyze the collective activity of neurons in other brain regions.

*Keywords:* place neurons, dimension reduction, distributed coding

## References

- [1] Gallego J. A., Perich M. G., Naufel S. N. et al., “Cortical population activity within a preserved neural manifold underlies multiple motor behaviors”, *Nat Commun*, 2018, № 9, 4233.

- [2] Gallego J. A., Perich M. G., Miller L. E., Solla S. A., “Neural manifolds for the control of movement”, *Neuron*, 2017, № 94, 978–984.
- [3] Sadtler P. T. et al., “Neural constraints on learning”, *Nature*, 2014, № 512, 423–426.
- [4] Yu B. M. et al., “Gaussian-process factor analysis for low-dimensional single-trial analysis of neural population activity”, *Neurophysiology*, 2009, № 102, 614–635.
- [5] Belkin M., Niyogi P., “Laplacian eigenmaps for dimensionality reduction and data representation”, *Neural computation*, **15**:6 (2003), pp. 1373–139.

# Исследование кальциевой активности нейронов ретроспленальной коры при обследовании нового пространства и объектов у мышей

О. С. Рогожникова<sup>1</sup>, О. И. Ивашкина<sup>2</sup>, К. А. Торопова<sup>3</sup>,  
М. А. Солотёнков<sup>4</sup>, И. В. Федотов<sup>5</sup>, А. М. Желтиков<sup>6</sup>,  
К. В. Анохин<sup>7</sup>

Ретроспленальная кора (РСК) играет ключевую роль в процессах пространственной навигации и кодировании пространственной информации. Однако участие РСК в кодировании информации об объектах изучено мало. В этой работе мы использовали оптоволоконную фотометрию для исследования кальциевой активности

---

<sup>1</sup>*Рогожникова Ольга Сергеевна* — лаб.-исследователь, Институт перспективных исследований мозга МГУ им. М.В. Ломоносова, e-mail: osrogozhnikova@gmail.com.

Rogozhnikova Olga Sergeevna — Research Assistant, Institute of Advanced Brain Studies of Lomonosov MSU

<sup>2</sup>*Ивашкина Ольга Игоревна* — м.н.с., НИЦ «Курчатовский Институт», Институт перспективных исследований мозга МГУ им. М.В. Ломоносова, e-mail: oivashkina@gmail.com.

Ivashkina Olga Igorevna — Junior Researcher, NRC «Kurchatov Institute, Institute of Advanced Brain Studies of Lomonosov MSU

<sup>3</sup>*Торопова Ксения Александровна* — м.н.с., НИЦ «Курчатовский Институт», Институт перспективных исследований мозга МГУ им. М.В. Ломоносова, e-mail: xen.alexander@gmail.com.

Toropova Ksenia Aleksandrovna — Junior Researcher, NRC «Kurchatov Institute, Institute of Advanced Brain Studies of Lomonosov MSU

<sup>4</sup>*Солотёнков Максим Андреевич* — аспирант, Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, e-mail: maksolo@list.ru.

Solotyunkov Maxim Andreevich — postgraduate student, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University

<sup>5</sup>*Федотов Илья Валерьевич* — старший преподаватель, Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, e-mail: fedotovilyaeg@mail.ru.

Fedotov Ilya Valeryevich — senior lecturer, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University

<sup>6</sup>*Желтиков Алексей Михайлович* — профессор, Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносов, e-mail: zheltikov@physics.msu.ru.

Zheltikov Alexei Mikhailovich — professor, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University

<sup>7</sup>*Анохин Константин Владимирович* — дир., академ. РАН, проф., д.м.н., Институт перспективных исследований мозга МГУ им. М.В. Ломоносов, e-mail: k.anokhin@gmail.com.

Anokhin Konstantin Vladimirovich — Director of Institute of Advanced Brain Studies of Lomonosov MSU, Academician of Russian Academy of Sciences, Professor, Doctor of Sciences in Medicine

РСК в задачах распознавания типа и положения объектов у мышей. Мы показали, что в момент контакта животного с объектом наблюдается снижение кальциевой активности РСК независимо от поведенческой задачи. При этом выполнение другой формы исследовательского поведения — стойки — не сопровождалось подобным снижением активности РСК. Таким образом, мы показали специфическое изменение активности РСК во время исследования объектов у мышей.

**Ключевые слова:** ретроспленальная кора, распознавание объектов, кальциевая активность, исследовательское поведение, оптоволоконная фотометрия.

Оказываясь в новой среде, животные ориентируются в нём по пространственным ключам, которые в данный момент отвечают определённым целям и потребностям. Известно, что при этом происходит формирование эпизодической памяти и построение когнитивной карты, отражающей характеристики среды через активность специализированных клеток, например, клеток места. Одной из структур мозга, участвующих в процессах формирования эпизодической памяти, является ретроспленальная кора (РСК). Нарушение функциональной целостности РСК ассоциировано с нарушением механизмов построения новых маршрутов в незнакомой среде [1]. Также известно, что РСК специфически активируется при обследовании животным новых объектов в знакомой среде [2]. Однако если животных с удалённой РСК поместить в знакомую среду, в которой переместили знакомый объект или заменили его новым, то наблюдается нарушение распознавания перемещённого, но не нового объекта [3]. Несмотря на большой объём накопленных данных, всё ещё остаётся не ясным характер специфичной активности РСК: когда она ассоциирована с обследованием пространства, а когда — объекта. В данной работе мы провели анализ кальциевой активности нейронов РСК во время исследовательского поведения мышей в двух типах задач: распознавание объекта нового типа и распознавание положения перемещённого объекта.

Регистрацию активности нейронов РСК проводили методом оптоволоконной фотометрии флуоресцентного сигнала кальциевого сенсора Yt<sub>2</sub>C [4]. Экспрессированный на мембране нейронов РСК кальциевый сенсор флуоресцирует в случае изменения внутриклеточной концентрации кальция в участке коры, облучаемом лазерным излучением с длиной волны в 473 нм через закреплённое на голове животного оптоволоконно. В эксперименте участвовало 7 взрослых мышей линии C57BL/6 (4-6 месяцев) обоих полов. Спустя 2 недели после операции мышам приучали к подключению оптоволоконна в течение трёх дней. Затем животное помещали на 20 мин в пустую арену с нанесёнными на стенки зрительными

ориентирами для ознакомления с обстановкой. На следующий день, при обучении, животным предъявляли два одинаковых объекта в знакомой арене. Через 24 часа, в тестовой сессии, мышам предъявляли два типа объектов в двух вариантах задачи: один из объектов заменяли на незнакомый (распознавание типа объектов) или один из знакомых объектов перемещали в новое положение (распознавание положения объектов). Для оценки памяти об объектах использовали длительность контакта с объектами (нюхает; прикасается; сидит рядом). В каждый день эксперимента осуществляли одновременную видеорегистрацию поведения животных и регистрацию кальциевой активности нейронов РСК. Кальциевыми событиями считали все значения зарегистрированного сигнала, превышающие более чем на 10% фоновое значение.

В ходе анализа кальциевой активности РСК в сессиях обучения и теста нами было показано снижение числа пиков ( $p < 0.05$ ) кальциевой активности нейронов РСК при контакте с объектами по сравнению с обследованием обстановки в обоих типах задач. При этом не было обнаружено изменения активности РСК в зависимости от того, какой именно объект животное обследовало: знакомый, объект нового типа или перемещённый объект. Также мы не обнаружили специфических изменений активности нейронов РСК при другом типе исследовательского поведения — стойках. Таким образом, мы предполагаем, что снижение суммарной активности РСК происходило не в связи с исследовательским поведением как таковым, а в связи с обследованием любых объектов, находящихся в среде. Поскольку волоконно-оптическая фотометрия позволяет регистрировать только популяционные кальциевые ответы, наши данные не дают однозначного вывода о паттернах активности отдельных клеток РСК. Возможно, именно поэтому несмотря на снижение числа пиков кальциевой активности при контакте животного с объектами, мы наблюдали рост средней величины кальциевого сигнала РСК при обследовании животным знакомого объекта в задаче распознавания объектов нового типа. Таким образом, в РСК могут существовать нейроны, специфически активирующиеся при контакте животного как со знакомым, так и с новым объектом. Чтобы проверить это предположение, необходимы дальнейшие исследования популяционной активности нейронов РСК с возможностью регистрировать активность отдельных клеток.

Работа поддержана грантом РФФИ №20-15-00283 и междисциплинарной научно-образовательной школой Московского университета «Мозг, когнитивные системы, искусственный интеллект».

## Список литературы

- [1] Maguire E., “The retrosplenial contribution to human navigation: a review of lesion and neuroimaging findings”, *Scandinavian journal of psychology*, **42**:3 (2001), 225–238.
- [2] de Landeta A., Pereyra M., Medina J., Katche C., “Anterior retrosplenial cortex is required for long-term object recognition memory”, *Scientific reports*, **10**:1 (2020), 1–13.
- [3] Vann S.D., Aggleton J.P., “Extensive cytotoxic lesions of the rat retrosplenial cortex reveal consistent deficits on tasks that tax allocentric spatial memory”, *Behavioral neuroscience*, **116**:1 (2002), 85–94.
- [4] Barykina N.V., Doronin D.A., Subach O.M., et al., “NTnC-like genetically encoded calcium indicator with a positive and enhanced response and fast kinetics”, *Scientific reports*, **8**:1 (2018), 1–19.

### Calcium activity of the retrosplenial cortex neurons during object and place recognition in mice

Rogozhnikova O.S., Ivashkina O.I., Toropova K.A., Solotenkov M.A., Fedotov I.V., Zheltikov A.M., Anokhin K.V.

The retrosplenial cortex (RSC) plays a key role in the processes of spatial navigation and coding of spatial information. However, the participation of the RSC in encoding information about objects has been studied little. In this work, we used fiber-optic photometry to record RSC calcium activity in novel object and novel place recognition tasks. We have shown that at the moment of animal contact with the object, there is a decrease in the calcium activity of the RSC, regardless of the behavioral task. At the same time, the performance of another form of exploration behavior — rearing, was not accompanied by a similar decrease in the activity of the RSC. Thus, we have shown a specific change in the activity of RSC during the object exploration in mice.

*Keywords:* retrosplenial cortex, object recognition, calcium imaging, exploratory behavior.

## References

- [1] Maguire E., “The retrosplenial contribution to human navigation: a review of lesion and neuroimaging findings”, *Scandinavian journal of psychology*, **42**:3 (2001), 225–238.
- [2] de Landeta A., Pereyra M., Medina J., Katche C., “Anterior retrosplenial cortex is required for long-term object recognition memory”, *Scientific reports*, **10**:1 (2020), 1–13.
- [3] Vann S.D., Aggleton J.P., “Extensive cytotoxic lesions of the rat retrosplenial cortex reveal consistent deficits on tasks that tax allocentric spatial memory”, *Behavioral neuroscience*, **116**:1 (2002), 85–94.



- [4] Barykina N.V., Doronin D.A., Subach O.M., et al., “NTnC-like genetically encoded calcium indicator with a positive and enhanced response and fast kinetics”, *Scientific reports*, **8**:1 (2018), 1–19.

# Нейроморфные системы машинного зрения

А. В. Теплюк<sup>1</sup>

Нейроморфные системы компьютерного зрения, также называемые событийными камерами, представляют собой сенсоры, основной принцип работы которых был заимствован из физиологического принципа работы человеческого зрения. Они отличаются от традиционных камер тем, что вместо того, чтобы выполнять снимки через фиксированные интервалы времени, они асинхронно детектируют изменения яркости каждой точки пространства, попадающего в объектив камеры. На выходе эти сенсоры генерируют поток пакетов с данными, где каждому пакету соответствует событие изменения яркости, а сам пакет содержит информацию о времени возникновения события, координатах пикселя и полярности изменения яркости (увеличение либо уменьшение). В статье приводится описание принципов работы событийных камер. Дается обзор их основных преимуществ, а также наиболее перспективных направлений для применения данной технологии в различных областях деятельности человека.

**Ключевые слова:** Событийные камеры, машинное зрение, нейроморфные системы, компьютерное зрение, асинхронные сенсоры, широкий динамический диапазон, робототехника.

## 1. Введение

Одна из сложнейших задач, над которой работают многие ученые, заключается в исследовании понимания механизмов работы мозга и воспроизведения этих принципов в вычислительных устройствах. Зрение же является основным органом чувств, с помощью которого человек, используя свой мозг, познает окружающее его пространство. Технология событийных камер изначально задумывалась, как попытка воспроизвести «в железе» биологические принципы работы человеческого зрения, с целью её дальнейшего практического использования в широком спектре различных задач, связанных с компьютерной обработкой визуальной информации.

Событийные камеры являются асинхронными сенсорами, позволяющими детектировать непрерывное динамическое изменение состояния

---

<sup>1</sup> *Теплюк Александр Викторович* — Аспирант, Сколковский институт науки и технологий, e-mail: Alexander.Teplyuk@skoltech.ru.

*Teplyuk Aleksandr Viktorovich* — PhD student, Skolkovo Institute of Science and Technology.

наблюдаемой сцены. Это кардинально отличает их от повсеместно используемых видео камер, которые способны фиксировать визуальное состояние сцены только в определенные равноудаленные промежутки времени.

Основными преимуществами событийных камер являются их высокая скорость работы, широкий динамический диапазон, позволяющий вести съемку в условиях крайне низкой или наоборот крайне высокой освещенности и низкое энергопотребление. Эти особенности данных камер привели в последнее время к повышенному интересу к ним со стороны компаний, занимающихся робототехникой и автономными устройствами.

## 2. Принцип работы событийной камеры

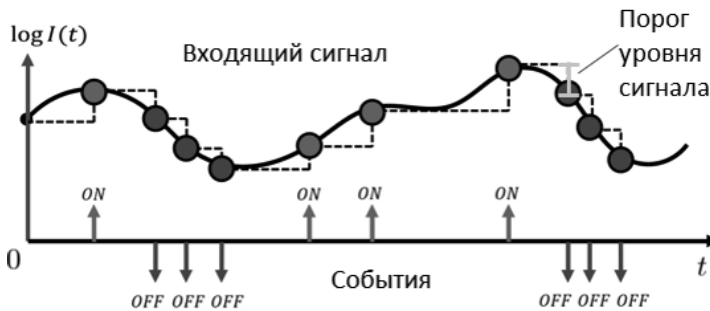


Рис. 1. Моменты генерации событий

Основной принцип работы событийной камеры (рис. 1) состоит в непрерывном отслеживании изменений яркости каждой точки наблюдаемой сцены и генерации события в тот момент, когда величина данного изменения превысит пороговое значение. Условие, при котором возникает генерация события описывается по формуле 1.

$$e = \{x, y, \check{p}, \check{t}\} : \exists e_{x,y}[j] \left( \check{p} = \begin{cases} 1 & \text{for } \int_{T[j-1]}^{\check{t}} C_{x,y}^t(t) + \dot{N}_{x,y}(t) dt \geq \theta^{ON} \\ 0 & \text{for } \int_{T[j-1]}^{\check{t}} C_{x,y}^t(t) + \dot{N}_{x,y}(t) dt \leq \theta^{OFF} \end{cases} \right)$$

Формула 1. Условие возникновения события.  $e$  – событие,  $N$  – шум,  $\theta$  – пороговое значение,  $x, y$  – координаты пикселя,  $p$  – полярность,  $t$  – время,  $C$  – контрастность

Контрастность  $C$  в момент времени  $t$  рассчитывается по формуле 2.

$$C_{x,y}^t(t) = \frac{1}{I_{x,y}(t)} \frac{dI_{x,y}(t)}{dt} = \frac{d(\ln(I_{x,y}(t)))}{dt}$$

Формула 2. Контрастность.  $t$  – время,  $I$  – яркость

### 3. Способы обработки данных, сгенерированных событийной камерой

Одним из ключевых моментов, связанных с практическим использованием событийных камер, является способ извлечения полезной информации из потока данных, генерируемого камерой. Конкретный способ обработки потока выходных данных, а также выбор алгоритмов, напрямую зависит от контекста решаемой задачи. В зависимости от количества одновременно обрабатываемых событий, можно выделить две категории алгоритмов: а) основанные на последовательной обработке каждого события с последующим изменением системы (рис.2), что позволяет достичь максимально быстрой реакции. б) основанные на единовременной обработке целой группы событий, выделенных на определенном временном интервале (рис. 3). Различие в этих подходах достаточно условное, ввиду того, что одно событие не содержит достаточно информации для оценки характера изменения наблюдаемой сцены, и необходимо использовать данные из предыдущих событий.

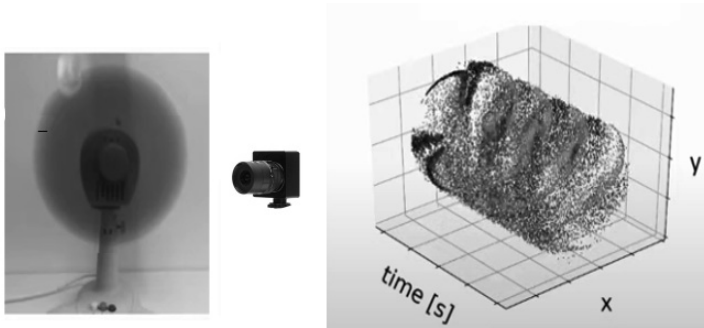


Рис. 2. Поток событий (справа), зафиксированных событийной камерой, направленной на вращающийся вентилятор (слева)

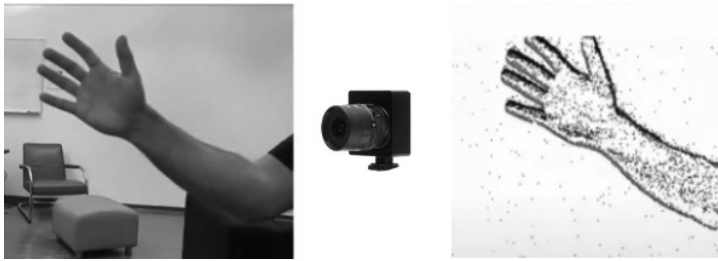


Рис. 3. Агрегация событий на определенном временном интервале (справа), зафиксированных событийной камерой, направленной на движущуюся руку (слева)

#### 4. Практическое применение технологии

На сегодняшний день существует множество прикладных задач, для решения которых применяются событийные камеры. Это трекинг объектов [1], [2], распознавание жестов [3], визуальная вибродиагностика, подсчет быстро движущихся мелких объектов на конвейерной ленте предприятия и др.

#### Список литературы

- [1] T. Delbruck and M. Lang, “Robotic goalie with 3ms reaction time at 4% CPU load using event-based dynamic vision sensor”, *Frontiers in Neuroscience*, **7** (2013), 223.
- [2] A. Glover and C. Bartolozzi, “Event-driven ball detection and gaze fixation in clutter”, *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2016.
- [3] G. Orchard, C. Meyer, R. Etienne-Cummings, C. Posch, N. Thakor, and R. Benosman, “HFirst: A temporal approach to object recognition”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **37**:10 (2015), 2028–2040.

#### Neuromorphic machine vision systems

Теплюк А.В.

Neuromorphic computer vision systems, also called event cameras, are sensors whose basic principle of operation was borrowed from the physiological principle of how human vision works. They differ from traditional cameras in that instead of taking pictures at fixed intervals, they asynchronously detects changes in the brightness of each point in the observed space. At the output, these sensors generate a stream

of data packets, where each packet corresponds to a brightness change event, and the packet itself contains information about time the event occurs, pixel coordinates and the nature of the brightness change (increase or decrease). The article describes principles of event cameras operations. Provides an overview of main advantages of event cameras, as well as the most promising areas for using this technology in various fields of human activity.

*Keywords:* Event cameras, machine vision, neuromorphic systems, computer vision, asynchronous sensors, high dynamic range, robots.

## References

- [1] T. Delbruck and M. Lang, “Robotic goalie with 3ms reaction time at 4% CPU load using event-based dynamic vision sensor”, *Frontiers in Neuroscience*, **7** (2013), 223.
- [2] A. Glover and C. Bartolozzi, “Event-driven ball detection and gaze fixation in clutter”, *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2016.
- [3] G. Orchard, C. Meyer, R. Etienne-Cummings, C. Posch, N. Thakor, and R. Benosman, “HFirst: A temporal approach to object recognition”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **37**:10 (2015), 2028–2040.

# Эффекты травматического опыта на поведение, экспрессию c-fos и функциональные связи в сети состояния покоя мозга мыши

К. А. Торопова<sup>1</sup>, О. И. Ивашкина<sup>2</sup>, А. А. Иванова<sup>3</sup>,  
Е. В. Коновалова<sup>4</sup>, К. В. Анохин<sup>5</sup>

Работа посвящена исследованию влияния посттравматического стрессового расстройства на спонтанное поведение и активность мозга животных в покое. Методами автоматизированного анализа поведения, Fos-нейроимиджинга и картирования сетей покоя показано, что стрессорный опыт изменяет спонтанное поведение, вызванную и спонтанную активность мозга, а также паттерны функциональных связей в сетях покоя через длительное время после травмы.

**Ключевые слова:** ПТСР, сети покоя, c-fos, спонтанное поведение, блокада синтеза белка.

Известно, что мозг животных и человека активен и в состоянии покоя, без специальной когнитивной нагрузки. В данной работе мы исследовали вопрос о том, как прошлый опыт влияет на характеристики

---

<sup>1</sup>Торопова Ксения Александровна — м.н.с., НИЦ «Курчатовский Институт», Институт перспективных исследований мозга МГУ им. М.В. Ломоносова, e-mail: xep.alexander@gmail.com.

Toropova Kseniia Aleksandrovna — Junior researcher, NRC «Kurchatov Institute», Institute of Advanced Brain Studies of Lomonosov MSU.

<sup>2</sup>Ивашкина Ольга Игоревна — м.н.с., НИЦ «Курчатовский Институт», Институт перспективных исследований мозга МГУ им. М.В. Ломоносова, e-mail: oivashkina@gmail.com.

Ivashkina Olga Igorevna — Junior researcher, NRC «Kurchatov Institute», Institute of Advanced Brain Studies of Lomonosov MSU.

<sup>3</sup>Иванова Анна Андреевна — м.н.с., НИЦ «Курчатовский Институт», Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, e-mail: anivas@mail.ru.

Ivanova Anna Andreevna — Junior researcher, NRC «Kurchatov Institute», Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of RAS.

<sup>4</sup>Коновалова Елена Владимировна — м.н.с., Научно-исследовательский институт нормальной физиологии имени П.К. Анохина, Москва, e-mail: allofenka@gmail.com.

Konovalova Elena Vladimirovna — Junior researcher, Research Institute of Normal Physiology named after P.K. Anokhin, Moscow.

<sup>5</sup>Анохин Константин Владимирович — дир., академ. РАН, проф., д.м.н., Институт перспективных исследований мозга МГУ им. М.В. Ломоносова, e-mail: k.anokhin@gmail.com.

Anokhin Konstantin Vladimirovich — Director of Institute of Advanced Brain Studies of Lomonosov MSU, Academician of Russian Academy of Sciences, Professor, Doctor of Sciences in Medicine.

таких сетей покоя в мозге животных. Для этого мышей подвергали однократному травматическому опыту, индуцировавшему у них посттравматическое стрессовое расстройство (ПТСР) и затем методом клеточного Fos-картирования анализировали активность их мозга (42 области мозга включающие ассоциативные, сенсорные и моторные области неокортекса, гиппокамп, парагиппокампальные области, миндалину, базальные ядра, ядра таламуса, гипоталамуса и среднего мозга) при извлечении травматической памяти и в состоянии покоя по сравнению с нестрессированными животными. Развитие ПТСР приводило к глобальным изменениям активности мозга: количество Fos-активных нейронов было значительно повышено в различных областях мозга при извлечении травматической памяти. Аналогично, в состоянии покоя у животных с ПТСР наблюдалась повышенная активность в 11 областях мозга, для которых ранее было показано участие в сетях страха у человека и животных.

Используя подходы теории графов, мы выявили функциональные связи в сети состояния покоя у мышей с ПТСР и у контрольных животных, а также определили основные кластеры этих сетей. Для этого экспериментально полученные сети сравнивали с модельными сетями: случайными, безмасштабными и сетями малого мира. У обеих групп мышей уровень кластеризации сети покоя был таким же, как у безмасштабной сети, то есть количество кластеров в экспериментальных сетях превосходило случайный уровень. В то же время эти кластеры слабо взаимодействовали друг с другом: глобальная эффективность экспериментальных сетей находилась на уровне случайной сети. При этом сети покоя у контрольных животных и мышей с ПТСР различались: сеть покоя ПТСР была менее кластеризованной, и кластеры были связаны между собой более длинными путями. Анализ функциональной связанности показал, что индукция ПТСР привела к глобальным изменениям в структуре сети покоя, затронувшим практически все области мозга. У наивных животных наибольшее количество связей приходилось на корковые области, тогда как у животных с ПТСР большинство связей приходилось на таламус, стриатум и миндалину. Индукция ПТСР разрушала практически все функциональные связи, присутствовавшие у наивных мышей; сохранялся только полносвязный кластер слуховых и зрительных областей коры. Кроме того, если у наивных животных основными хабами сети покоя были цингулярная и ретроспленальная кора, то у животных с ПТСР эти области практически полностью теряли свои функциональные связи, а хабом становилось паравентрикулярное ядро таламуса. Напротив, функциональная связанность миндалины была практически нулевой у наивных животных, тогда как после индукции ПТСР наблюдалось значительное количество связей между миндалиной, ассоциативными областями коры и стриатумом.



Кроме того, нами было показано, что индукция ПТСР изменяет спонтанное поведение животных, вызывая у них проявления тревожности и снижение исследовательской активности в безопасных условиях домашних клеток. Также изменялось и поведение мышей в тестах на обусловленный страх, тревожность и поведенческую сенситизацию, причем эти изменения могли быть нарушены блокадой синтеза белка при получении животными травматического опыта. Также блокада синтеза белка при индукции ПТСР возвращала к норме активность мозга и структуру сетей покоя животных.

Наши данные показывают, что стрессорный опыт может изменять спонтанное поведение, вызванную и спонтанную активность мозга, а также паттерны функциональных связей в нейронных сетях покоя через длительное время после травмирующего эпизода. Мы предполагаем, что эти изменения отражают повторное проигрывание нейрональных ансамблей прошлого субъективного опыта животного. Это предположение было проверено путем нарушения развития ПТСР.

Работа выполнена при финансовой поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школой Московского университета «Мозг, когнитивные системы, искусственный интеллект», а также РФФИ (проекты №№ 19-015-00534, 20-015-00427).

### **The effects of traumatic experience on the behavior, c-fos expression and functional connections in the mouse brain resting state network**

**Toropova K.A., Ivashkina O.I., Ivanova A.A., Konovalova E.V., Anokhin K.V.**

In this study we investigated the influence of post-traumatic stress disorder on spontaneous behavior and resting state brain activity of animals. Using automated behavior analysis, Fos-neuroimaging and rest network mapping, we showed stressful experiences can alter spontaneous behavior, induced and spontaneous brain activity and patterns of functional connections in resting state neuronal networks long after trauma.

*Keywords:* PTSD, resting state networks, c-fos, spontaneous behavior, protein synthesis inhibition.

# Об одном способе моделирования когнитивно-ограниченных выводов формул

Д. Н. Федянин<sup>1</sup>

В работе предлагается модель размышлений агентов при учете эффекта забывания агентами неиспользуемых формул и ограничений на сложность формул. Обсуждаются формальная постановка, модификации, мотивация и обоснование ее адекватности.

**Ключевые слова:** исчисление, полнота, мультиагентная система, неклассические логики, сложность, социальная сеть.

Задача моделирования когнитивно-ограниченных выводов формул давно привлекает внимание исследователей, например, [7]. Это связано и с тем, что логика предполагает обычно идеальную способность к мгновенному выводу любых истинных утверждений при полноте логических систем, к чему обычно ни один реальный агент не способен. Соответственно для моделирования реальных систем иногда используются естественные ограничения на размышления агентов. Отметим, что вопрос сложности алгоритмов или реализуемости алгоритмов при заданных ограничениях на размер памяти или количество операций является без сомнений одной из фундаментальных проблем в области дискретной математики и теории алгоритмов.

Ниже представлен из авторских вариантов таких моделей. Пусть задан язык как множество формул, и зафиксируем некоторое подмножество формул в качестве уже доказанных. Введем функцию от формулы — целое неотрицательное число — и назовем ее активностью формулы и обозначим  $a$ . При первом попадании в подмножество доказанных активность формулы устанавливается по некоторому правилу в зависимости от способа, которым она была выведена.

Зададим также другую функцию, которую мы назовем сложностью формулы. Сложность любой формулы равна количеству использованных при ее записи знаков — знаков операций и переменных. Назовем когнитивной операцией правило вывода новой формулы, например, замену переменных, или *Modus ponens*.

---

<sup>1</sup> Федянин Денис Николаевич — научный сотрудник, Международная лаборатория логики, лингвистики и формальной философии, Высшая школа экономики, e-mail: dfedyanin@inbox.ru.

Fedyanin Denis Nikolaevich — researcher, International Laboratory for Logic, Linguistics and Formal Philosophy, Higher school of economics.

Идея заключается в том, что мы разрешаем только те выводы, которые создают формулы не более заданной сложности  $C$ , при этом на каждом выполнении операции активность формулы не использованной в ней уменьшается на единицу или в общем случае, на значение некоторой монотонной функции от сложности формулы, в то время как активность использованной формулы после ее использования повышается по некоторому правилу. При этом в когнитивных операциях не могут использоваться формулы с неположительной активностью.

Соответственно возникает проблема доказательства заданной формулы из некоторых начальных, при заданных параметрах когнитивной способности агента [4, 5]. Может оказаться, что традиционные способы доказательств не могут использоваться из-за слишком быстрого снижения активности промежуточных или даже исходных формул [3] или чрезмерной сложности формул, используемых в доказательстве [6, 9].

Задачей управления соответственно является проверка выводимости и подбор функции снижения активности и ограничения на сложность для обеспечения выводимости заданного набора формул, в предположении об их выводимости при отсутствии снижения активности и ограничений на сложность. В многоагентном случае, если задана социальная сеть агентов, то повышение активности формулы при выводе ее одним из агентов может повышать ее активность и у других агентов. При этом в более общем случае — агент сам выбирает активность каких именно его формул он повысит или понизит активность формул у его социальных соседей. Работы в исследовании подобных моделей активно ведутся, например, [8].

Важной модификацией модели для целей исследования социальных систем или систем моделирующих социальные системы представляется введение целевой функции для множеств формул и мотивация агента выводить те формулы, которые дадут ему большую суммарную полезность. При этом необязательно, чтобы агент знал стоимость новой формулы до ее вывода, так как вполне может использовать эволюционные методы оптимизации. Такие методы позволяют также исследовать наиболее случай, когда вывод производится случайным образом в стиле случайного блуждания. Целевая функция вполне соответствует реальной ситуации, когда знание истинности некоторого утверждения дает преимущество — например, получение патента, или последующего использования в принятии решений. Более сложной дополнительной модификацией может быть конкуренция среди групп агентов за наиболее быстрый вывод каких-то формул, что еще более повышает значимость социальной составляющей.

Некоторые первичные наблюдения

- 1) Иногда агенту может оказаться формулу просто “вспоминать” — использовать в когнитивной операции просто для повышения ее активности для последующего использования в прошлом.
- 2) Часть начальных теорем принятых за аксиомы в процессе может получить нулевую активность, что вполне соответствует эффекту сохранения культурных традиций, но не понимания причин их возникновения.
- 3) Если сложность формулы сильно уменьшает ее активность, то может быть выгодно разбивать формулы на более мелкие, например, через ДНФ. И наоборот, если сложность мало влияет, то “сплавлять” несколько более мелких формул в большую дизъюнкцией.
- 4) Если активность падает очень быстро по сравнению с начальным значением активности при выводе формулы, то важным становится формирование небольшого набора коротких схем для возможности выведения произвольной формулы при необходимости (полезность формулы может быть функцией также и времени).

Отметим, что методы снижения активности формулы делает модель схожей с известной оптимизацией муравьиными алгоритмами [1, 2], а также представляется весьма схожей с естественным образом размышления людей, когда малоупотребительные знания постепенно вытесняются более активно используемыми. Такой эффект играет одну из ключевых ролей в педагогике как неформальной, так и в ее математизированных направлениях [10].

## Список литературы

- [1] Deng, Wu, Junjie Xu, Yingjie Song, Huimin Zhao, “An effective improved co-evolution ant colony optimisation algorithm with multi-strategies and its application.”, *International Journal of Bio-Inspired Computation*, **16:3** (2020), 158–170.
- [2] Dorigo, Marco, Christian Blum, “Ant colony optimization theory: A survey.”, *Theoretical computer science*, **344.2:3** (2005), 243–278.
- [3] Chakraborty, Doran, Peter Stone., “Multiagent learning in the presence of memory-bounded agents”, *Autonomous agents and multi-agent systems*, **28:2** (2014), 182–213.
- [4] Stalnaker, Robert., “The problem of logical omniscience, I.”, *Synthese*, 1991, 425–440.
- [5] Hawke, Peter, Aybüke Özgün, Francesco Berto, “The fundamental problem of logical omniscience.”, *Journal of Philosophical Logic*, **49:4** (2020), 727–766.
- [6] Artemov S, Kuznets R., “Logical omniscience as a computational complexity problem.”, *In Proceedings of the 12th Conference on Theoretical Aspects of Rationality and Knowledge*, 2009, 14–23.

- [7] Smets, Sonja, Anthia Solaki., “The effort of reasoning: Modelling the inference steps of boundedly rational agents.”, *In International Workshop on Logic, Language, Information, and Computation, Springer, Berlin, Heidelberg*, 2018, 307–324.
- [8] Solaki, Anthia, “Bounded Multi-agent Reasoning: Actualizing Distributed Knowledge.”, *In International Workshop on Dynamic Logic, Springer, Cham*, 2020, 239–258.
- [9] Artemov S, Kuznets R., “Logical omniscience via proof complexity.”, *In International Workshop on Computer Science Logic. Springer, Berlin, Heidelberg.*, 2006, 135–149.
- [10] Squire, Larry R., “Memory systems of the brain: a brief history and current perspective.”, *Neurobiology of learning and memory*, **82:3** (2004), 171–177.

**On one method for modeling cognitively limited inferences of formulas**  
**Fedyanin D.N.**

In the proposed model, agents’ reflections are proposed taking into account the effect of forgetting unused constraints and on complexity. The formal setting, modifications, motivation and justification of its adequacy are discussed.

*Keywords:* calculus, completeness, multi-agent system, non-classical logics, complexity, social network.

## References

- [1] Deng, Wu, Junjie Xu, Yingjie Song, Huimin Zhao, “An effective improved co-evolution ant colony optimisation algorithm with multi-strategies and its application.”, *International Journal of Bio-Inspired Computation*, **16:3** (2020), 158–170.
- [2] Dorigo, Marco, Christian Blum, “Ant colony optimization theory: A survey.”, *Theoretical computer science*, **344.2:3** (2005), 243–278.
- [3] Chakraborty, Doran, Peter Stone., “Multiagent learning in the presence of memory-bounded agents”, *Autonomous agents and multi-agent systems*, **28:2** (2014), 182–213.
- [4] Stalnaker, Robert., “The problem of logical omniscience, I.”, *Synthese*, 1991, 425–440.
- [5] Hawke, Peter, Aybüke Özgün, Francesco Berto, “The fundamental problem of logical omniscience.”, *Journal of Philosophical Logic*, **49:4** (2020), 727–766.
- [6] Artemov S, Kuznets R., “Logical omniscience as a computational complexity problem.”, *In Proceedings of the 12th Conference on Theoretical Aspects of Rationality and Knowledge*, 2009, 14–23.
- [7] Smets, Sonja, Anthia Solaki., “The effort of reasoning: Modelling the inference steps of boundedly rational agents.”, *In International Workshop on Logic, Language, Information, and Computation, Springer, Berlin, Heidelberg*, 2018, 307–324.

- [8] Solaki, Anthia, “Bounded Multi-agent Reasoning: Actualizing Distributed Knowledge.”, *In International Workshop on Dynamic Logic*, Springer, Cham, 2020, 239–258.
- [9] Artemov S, Kuznets R., “Logical omniscience via proof complexity.”, *In International Workshop on Computer Science Logic*. Springer, Berlin, Heidelberg., 2006, 135–149.
- [10] Squire, Larry R., “Memory systems of the brain: a brief history and current perspective.”, *Neurobiology of learning and memory*, **82**:3 (2004), 171–177.

## Часть 8.

# Человеко-ориентированный искусственный интеллект и нейроинтерфейсные технологии

# Artificial Intelligence Enhanced By Modelling

B. Thalheim<sup>1</sup>

One of the biggest hypes in current research is Artificial Intelligence. Similar to the AI 1.0, 2.0, and 3.0 hypes, the claim is that AI will help to solve all problems everywhere and anytime, will replace almost all human activities by greater machinery, will be far more intelligent than humans, will be far more reliable than humans, and will be the basis for greater wealth.

We briefly investigate whether it is possible and figure out that these and other promises are not realistic. A silver bullet is, however, modelling since it is more concerned with human intelligence.

*Keywords:* artificial intelligence, human intelligence, modelling, AI models.

Devoted V.B. Kudrjavcev

## 1. Is AI 4.0 Mainly Money-Gathering Research?

**AI 4.0 is Another Hype.** Artificial Intelligence became again a hype in Computer Science. Researchers claim that this new wave of AI is going to solve all mankind problems and being the starting point of best intelligence. It seems that AI will cover any human activity and allows to proceed in a far better way. Weak AI solutions are reality. Strong AI is still a dream and might be achievable within this century. The claim that AI will lead to systems that think alike humans is completely infeasible. So far, AI is nothing else than another instrument for our life and practice.

**A Reservation.** The superiority of AI is based on its ability to handle big amounts of data mined from a variety of distributed sources. This superiority is based on “brute force” controlled by algorithms. In a way, even HI is based on algorithms – in most cases far more advanced. Researchers have tried to adopt these algorithms to be applied in AI. Learning is the key element in the current wave of AI. This is good start towards HI, but still a lot is missing: human sense, human kind of criticism, emotions and human ethics are examples of the missing elements. Current AI (weak, narrow) is still context dependent and not transferrable to new application areas.

Therefore, we present some doubts on the success of such promises. Whether AI will cover all human abilities and will replace humans in

---

<sup>1</sup>*Bernhard Thalheim* — Prof. Dr.rer.nat.habil., Retired from Christian Albrcht University Kiel, Germany, email: bernhard.thalheim@email.uni-kiel.de.



everyday life is not an open issue. It is in this direction an overstatement and misleading.

Human intelligence (HI) is oriented on the needs and challenges a human face. It also supports human societies. There are many tasks that are handled by humans and living beings. AI might be able to cover a good number of tasks — at least in the form of strong AI. So far, we are covering a small portion of HI tasks as weak AI. Coverage of the other kinds of HI is currently infeasible.

**Realism Lost in Computer Science.** Computer realisations are based on the Turing machine approach to computation. This computation paradigm is the basis for digitalisation of processes, for support of stereotyped and normalised handling of data and algorithms, and for AI as well.

There are, however, other human abilities beyond digital computation such as analog computation, approximate and plausible reasoning, and non-rational problem solving. Additionally, digital computing on the Turing machine paradigm is restricted. In a nutshell, the second Rice theorem says that anything that is computable is trivial in the sense that either the solution or the counter-solution is finitely enumerable. There are already proposals for novel computation paradigms.

**State-Of-The-Art So Far.** Our artificial systems do not really produce anything new in reality. They bring, however, another kind of toolbox and instrument a great purely practical improvement in life. They increase speed, effectivity, and performance for everybody who has access to them. They enable a comfortable life for many people. Whether we call them ‘intelligent’ is a definition matter for intelligence.

What we achieved so far is the development of yet another tool and instrument for more convenient life, e.g. for support of industry, science, and technology.

**Our Agenda: Towards Support of Human Intelligence.** After a brief analysis of the potential and capacity of current AI, we introduce in this short paper a new discipline: systematic studies of models and modelling. Models are a universal instrument in science, technology, and daily life. They function as instruments in almost every scenario. This paper is a short note and a review based on our papers [1, 2, 3].

## 2. The Horizon of Possibilities

**Human Intelligence is Far Broader.** One reason for the AI-HI mismatch is the variety of human reasoning mechanisms. Weak AI has

assumed that these mechanisms are algorithm-based and supported by first-order logical calculi. A second reason is the ability of humans to non-rational reasoning. A third mechanism is human reasoning in general that is not only deductive or calculus-based. A fourth reason is that humans can survive with incomplete data. Moreover, cognitive systems are energy-minimal, interactive in a wide variation, evolutionary, and potentially unbounded. The cognition goes far beyond machine learning, neural networks, databases that are called knowledge bases, and linguistic systems.

**Kinds of Human Intelligence.** HI is far more advanced and broader. We claim that most of HI cannot be covered by current programming approaches. Let us consider some kinds of human intelligence:

**Creative or success** intelligence such as:

- Linguistic, narrative or verbal intelligence
  - metaphorical intelligence
- Musical intelligence
- Abstract intelligence
  - analytical intelligence
  - logical-mathematical intelligence
  - numerical intelligence
- Intuitive intelligence
  - crystallized intelligence
- Practical intelligence
  - application intelligence
  - practical wisdom
- Imaginative intelligence
- Physical-kinesthetic intelligence
- Spatial intelligence
- Visual intelligence

**Emotional or social** intelligence such as:

- Perception of emotions
- Use and understanding of emotions (to facilitate thinking)
- Intra- and interpersonal intelligence
- Machiavellian intelligence
- Ability to manipulate
- Ability to deceive
- Ability to make assessments
- Disposal of second-order mental representation
- Pedagogical intelligence
- Regulation of emotions

**Spiritual or existential** intelligence such as:

- Moral and ethical intelligence including appreciation
- Ability to achieve extraordinary states of consciousness, spiritual abilities to solve

**Body** intelligence (our second HI reasoning system) such as:

- Perception of emotions
- Vegetative nerve system as part of body intelligence almost autonomous; heavily interacting and optimising
- As symbiotic system with bacteria (and may be viruses) that properly support.

**Survival** intelligence for the species (as third HI system) such as:

- Sexual sustainability; selection of an appropriate partner; activation as a main driving force for certain moments with overruling all other organs;
- Group and society compromising including social interaction;
- Fear and other functions of the limbic system with autotimer functionality for other two intelligent systems.

If we deliberate this small list and compare it with recent achievements then we discover how far we are at present from real AI-backed HI. Strong AI might cover the first kinds. Currently, weak AI covers a small portion of the first kind. For instance, neural networks follow the old-fashioned 70-years-old understanding of neurons. They can mimic normalised and average behaviour in simple approximation at the level of a house pet if highest quality data are available. They can be used for approximation by polynoms (degree +2 of the layers of the network; e.g. one layer = splines). Whenever the full picture or the non-average case or changing data must be considered this approach is out of any chance. The rest of intelligence seems to be infeasible. Infeasibility is also caused by the believe that solutions can be entirely based on programs within current computer approaches.

### 3. Modelling for Overcoming the Mismatch

**Modelling – The Denouement.** The main reason for the AI-HI mismatch is, however, that humans often use models for any kind of activity including reasoning. Rational reasoning is partially based on plausible and approximative techniques beyond induction and abduction. Non-rational reasoning on the basis of models has already found some theoretical basis.

Models are a universal instrument in science, technology, and daily life [4, 5]. They function as instruments in almost every scenario. Any human activity can be (and is) supported by models, e.g. reason, explain, design,

act, predict, explore, communicate, collaborate, interact, orient, direct, guide, socialises, perceive, reflect, develop, making sense, teach, learn, imagine, etc. This universal suitability is also the basis for a wide use of models and modelling in Computer Science and Engineering. A claim often met is that model theory in classical logics has a different treatment of models. Our general notion covers this specific case as well:

A **model** is a well-formed, adequate, and dependable instrument that represents 'something' (called origin as a source, archetype, starting point) and functions in scenarios of use.

The criteria of well-formedness are often considered a specific requirement of the modelling language or more generally of the model formation. The criteria for *adequacy* are (1) analogy (as a generalisation of the mapping property, which forms a rather narrow kind of analogy), (2) focussedness (as a generalisation of reduction to central properties or abstraction), and (3) usefulness (or purposiveness) (as a generalisation of classical pragmatics or substitution properties). *Dependability* is often concealed, implicit, and yet central part of the model-being of objects and ideas. A model has to be *justified* or viable and has to be of a sufficient quality. *Well-formedness* is a specific modelling language requirement for model's convenience and ease of use and understandability. It enables an instrument to be justified by an empirical corroboration according to its objectives, by rational coherence and conformity explicitly stated through conformity formulas or statements, by falsifiability or validation, and by stability and plasticity within a collection of origins. The instrument is *sufficient by its quality* characterisation for internal quality, external quality and quality in use or through quality characteristics. A well-formed instrument is called *dependable* if it is sufficient and is justified for some of the justification properties and some of the sufficiency characteristics.

We notice that all properties are parametric and can be refined in dependence of their envisioned function in scenarios of use. Configuration is a typical refinement in modelling. Configuration directly leads to special disciplinary notions. For instance, a *conceptual model* is a concise and purposeful consolidation of a set of concepts that are presented by means of terms in a predefined linguistic format. As such it establishes a view of a given notion space.

**Model-based Reasoning and Activities** Let us now briefly discuss how powerful is model-based reasoning and model usage [8] beside the initiative Models-as-Program or at least Modelling-as-Programming [6]. We realise that model-based human reasoning and human activities are far more advanced than supportable at present. Figure 1 depicts the variety of model-based support for HI.

Other typical HI techniques are enhancements similar to conceptualisation, model inheritance from generic or reference models, parameter hardening used for inverse modelling in physics, model-based checking and control for systems, and simulation of behaviour for some of the parameters. Cognitive modelling is another important HI technique. Shallow and deep reasoning techniques are another lacuna for the study of models.

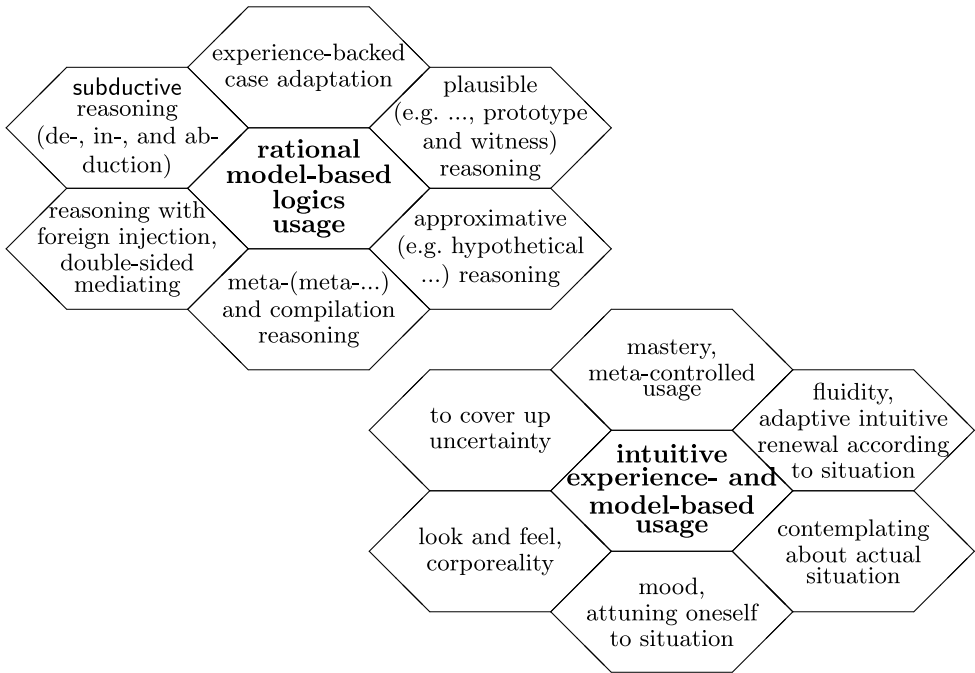


Fig. 1. Rational and intuitive model-based reasoning and activities (revised from [8])

## 4. Finally

Our reservation is based on the wide range of human intelligence that cannot be easily covered and on the limited computer science that is based on a too simple computation paradigm. Human intelligence is far broader than covered so. AI provides only some solutions to some of the kinds of one of the five dimensions. Problem-solving intelligence might be partially covered by algorithmics and somehow “intelligent” machines.

Instead, we consider models and modelling as one of the loopholes, back doors, or first and certainly powerful resource to develop support for human

intelligence. Model-based reasoning is the real kind of human reasoning [7]. Models are universal instruments for humans. So, we might ask whether we should develop AI models as an alternative. What is meant for models is not so much aesthetics but parsimony, understandability, believability, harmony, and balance, that the chosen concepts fit together and appropriate compromises are reached.

**Remark:** The full version of the talk given at the 12<sup>th</sup> International Conference “Artificial Intelligence and Computer Science” has been recorded and can be viewed and downloaded from the YouTube channel “Bernhard Thalheim”:  
<https://youtu.be/TAc3S7bCli8>.

## References

- [1] H. Jaakkola, J. Henno, J. Mäkelä, B. Thalheim, “Today is the future of yesterday; what is the future of today?”, *Proc. MIPRO 2017*, 2017, 635–643.
- [2] H. Jaakkola, J. Henno, J. Mäkelä, B. Thalheim, “Artificial Intelligence Yesterday, Today and Tomorrow”, *Proc. MIPRO 2019*, 2019, 860–867.
- [3] H. Jaakkola, B. Thalheim, J. Henno, “About the essence of intelligence – will artificial intelligence (ever) cover human intelligence?”, *Information Modelling and Knowledge Bases XXXIII*, **343** (2021), 19–43.
- [4] B. Thalheim, “Models, To Model, and Modelling - Towards a Theory of Models, especially Conceptual Models and Modelling”, *First Collection of Recent Papers (2009-2014)*, 2020.
- [5] B. Thalheim, “Twenty lectures for the CAU@Kiel module: Models and modelling in Computer Science”, <https://www.youtube.com/channel/UCwTZHnwgx8jLok-QMeKxslw>.
- [6] B. Thalheim, “From models for programming to modelling to program and towards models as programs”, *Communications in Computer and Information Science*, **1401** (2021), 3–44.
- [7] B. Thalheim, “Model-based reasoning”, *Proc. 31<sup>th</sup> EJC*, 2021, 4–23.
- [8] B. Thalheim, “Models: The fourth dimension of computer science – towards studies of models and modelling”, *Software and Systems Modeling*, 2021.

# Философский анализ ограничений использования систем искусственного интеллекта в образовании

Е. В. Брызгалина<sup>1</sup>

В докладе показано, что развитие систем ИИ связывают с персонализацией и индивидуализацией процесса образования за счет формирования индивидуальных образовательных программ, индивидуального графика образовательного процесса с учетом индивидуального опыта, стиля мышления, уровня знаний, для максимального психологического комфорта ребенка. Системы ИИ смогут повысить доступность образования, поддержать профориентацию и трудоустройство за счет анализа сформированных компетенций. Сторонники применения ИИ в образовании выделяют ряд возможных преимуществ технологий ИИ для ребенка: новизна, возможное повышение вовлеченности и мотивации; возможность поставить индивидуальные задачи в зависимости особенностей, что помогает детям почувствовать себя особенными.

В образовании должна обсуждаться дилемма индивидуальной автономии и общественного блага, поскольку ИИ вызывает обострение противоречий между неприкосновенностью частной жизни, уважением достоинства и автономии человека и пониманием образования как общественного блага. Очень острая проблема – конфиденциальности информации, определение режимов и уровня доступности к той информации, с которой работает ИИ, и рекомендации, которые он дает. Дифференциация в образовании рискует стать фактором стигматизации и дискриминации. Системы ИИ могут служить усилению социальной нормированности, то есть результат применения ИИ может быть прямо противоположным, чем персонализация. Не решена для образования проблема ответственности при применении ИИ и проблема создания «trustworthy AI». Нуждается в разработке этика взаимодействия ребенка с искусственным интеллектом, не ясны психологические эффекты взаимодействия ребенка с системой ИИ.

**Ключевые слова:** философия образования, искусственный интеллект, сущность образования, этика искусственного интеллекта.

---

<sup>1</sup>Брызгалина Елена Владимировна — кандидат философских наук, доцент, заведующий кафедрой Философии образования Философского факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, e-mail: Bryzgalina.e.v@gmail.com.

Bryzgalina Elena Vladimirovna — Ph.D. in philosophy, Associate Professor, Head of the Philosophy of Education Department, Faculty of Philosophy, Lomonosov Moscow State University.

# 1. Введение

Многие страны избрали образование одной из ключевых сфер использования ИИ. Основные цели применения систем ИИ в образовании присутствуют в официальных документах международных организаций (например ЮНЕСКО [1]), государственных документах [2] и экспертных статьях [3].

Представляется, что ключевые ограничения на использование систем ИИ в образовании связаны не с техническими параметрами решений, не с требованиями к инфраструктуре системы образования, и не с уровнем цифровых компетенций каждого субъекта образовательного процесса. Ключевые ограничения касаются методологических и аксиологических параметров внедрения технологий ИИ в образование, обсуждение которых существенно отстает от технико-технологических возможностей, но активно развивается на авторитетных международных и национальных площадках. ЮНЕСКО выпустила документы, освещающие этические и социальные проблемы применения ИИ [4][5]. В России принят Кодекс этики в сфере ИИ, подготовленный и подписанный ведущими компаниями лидерами в сфере разработки ИИ [6].

Фиксация цифровых данных, относящихся к различным субъектам образования и их интерпретация в образовании как системе, процессе и результате, связаны методологическим ограничениями по выявлению значимых, подлежащих количественной фиксации параметров, по определению зависимости их интерпретаций от используемых моделей. В образовании с очевидностью присутствуют неподлежащие количественной фиксации параметры коммуникации в образовательном процессе, влияющие на результативность образования.

Этико-правое регулирование внедрения технологий ИИ в образование фиксирует как общие ограничения, обсуждающиеся относительно использования технологий ИИ в любых сферах жизни общества, так и специфично проявляющиеся именно в сфере образования. К числу общих могут быть отнесены проблемы онтологической неопределенности ИИ, проблема достижимости «прозрачного» (или «доверенного») искусственного интеллекта, проблема отсутствия дискриминационных последствий применения ИИ, конфиденциальности информации и ответственности.

Использование систем ИИ в образовании связано с высоким рискованным потенциалом, оценка которого замыкается на глубинные ценностные основания культуры и экзистенциальную безопасность человека [7]. В образовании должна обсуждаться дилемма индивидуальной автономии и общественного блага, поскольку ИИ обостряет противоречия между неприкосновенностью частной жизни и пониманием образования



как общественного блага. Обязательное требование конфиденциальности информации, определение режимов доступа к той информации, с которой работает ИИ, и рекомендациям, которые он дает – вопросы, требующие жесткого механизма, поскольку субъектом информации являются несовершеннолетние дети. В образовании в специальной проработке нуждается создание условий для взаимодействия обучающихся с ИИ на базе этических и правовых норм, обеспечивающих права и благополучие несовершеннолетних.

Развитие технологий при недостаточности знаний о рисках и потенциальных угрозах технологий ИИ в образовании требуют дополнительного обсуждения научных представлений о природе человека, о статусе ребенка и детства в цифровом мире, о сущности обучения и воспитания.

## Список литературы

- [1] Pedro F., Subosa M., Rivas A., Valverde P., “Artificial intelligence in education: challenges and opportunities for sustainable development”, 2019, <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000366994f>.
- [2] “Указ Президента Российской Федерации от 10.10.2019 № 490 "О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации". Официальное интернет-представительство президента России”, 2019, <http://www.kremlin.ru/acts/bank/44731>.
- [3] Брызгалина Е. В., “Искусственный интеллект в образовании. Анализ целей внедрения”, *Человек*, **32**:2 (2021), 9–29.
- [4] “Report «First draft of the Recommendation on the Ethics of Artificial Intelligence»”, 2020, <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000373434>.
- [5] “Report «Steering AI and Advanced ICTs for Knowledge Societies: Rights, Openness, Access, and Multi-stakeholder Perspectives»”, 2019, <https://www.unesco.de/sites/default/files/2019-11/372132eng.pdf>.
- [6] “Кодекс этики в сфере искусственного интеллекта”, <https://www.aiethic.ru/code?fbclid=IwAR2ua-vuwQ8icTApgyER42IjpvnfHzMo8kuEnjx5OzSZItPFpV3Bp8oJFNQ>.
- [7] Critch A., Krueger D., “AI Research Considerations for Human Existential Safety (ARCHES).”, 2020, <https://arxiv.org/pdf/2006.04948.pdf>.

## Philosophical analysis of restrictions of using artificial intelligence systems in education

**Bryzgalina E.V.**

The report demonstrates that the development of AI systems is associated with personalization and individualization of educational process through the formation of individual educational programs, an individual schedule of the educational process, taking into account individual experience, style of thinking, level of knowledge, for maximum psychological comfort of the child. Proponents of the use

of AI in education highlight a number of possible advantages of AI technologies for a child: novelty, possible increase in involvement and motivation; the ability to set individual tasks, depending on the characteristics, which helps child to feel special.

Education should address the dilemma of individual autonomy and public good, as AI raises the tension between privacy, respect for human dignity and autonomy, and understanding education as a public good. A very acute problem is the confidentiality of information, the definition of modes and levels of accessibility to the information with which the AI works, and the recommendations that it gives. Dattification in education runs the risk of becoming a factor of stigma and discrimination. AI systems can serve to enhance social normalization, that is, the result of using AI can be exactly the opposite than personification. The problem of responsibility in the application of AI and the problem of creating "trustworthy AI" have not been solved for education. The ethics of the child's interaction with artificial intelligence needs to be developed, the psychological effects of the child's interaction with the AI system are not clear.

*Keywords:* philosophy of education, artificial intelligence, essence of education, ethics of artificial intelligence.

## References

- [1] Pedro F., Subosa M., Rivas A., Valverde P., "Artificial intelligence in education: challenges and opportunities for sustainable development.", 2019, <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000366994f>.
- [2] "Decree of the President of the Russian Federation of 10.10.2019№ 490 "On the development of artificial intelligence in Of the Russian Federation". The official Internet representation of the President of Russia.", 2019 (In Russian), <http://www.kremlin.ru/acts/bank/44731>.
- [3] Bryzgalkina E. V., "Artificial intelligence in education. Analysis of implementation goals.", *Human*, **32:2** (2021), 9–29 (In Russian).
- [4] "Report «First draft of the Recommendation on the Ethics of Artificial Intelligence».", 2020, <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000373434>.
- [5] "Report «Steering AI and Advanced ICTs for Knowledge Societies: Rights, Openness, Access, and Multi-stakeholder Perspective».", 2019, <https://www.unesco.de/sites/default/files/2019-11/372132eng.pdf>.
- [6] "Code of Ethics in the field of Artificial Intelligence." (In Russian), <https://www.aiethic.ru/code?fbclid=IwAR2ua-vuwQ8icTApgyER42IjpvnfHzMo8kuEnjx5OzSZItPFPV3Bp8oJFNQ>.
- [7] Critch A., Krueger D., "AI Research Considerations for Human Existential Safety (ARCHES).", 2020, <https://arxiv.org/pdf/2006.04948.pdf>.

# Великий уравниватель. Может ли голосовой помощник модерировать групповое взаимодействие?

Ф. Н. Винокуров<sup>1</sup>, К. А. Панов<sup>2</sup>

В работе предпринята попытка наблюдения за модерацией голосовым помощником группового взаимодействия. Выявлены особенности динамики взаимодействия членов группы, модерируемой голосовым помощником. Обсуждаются технические ограничения при проектировании навыков голосового помощника для модерации группового взаимодействия. Заметная членам группы алгоритмичность навыка голосового помощника снижает вовлеченность в процесс взаимодействия. Однако за счёт технических ограничений члены группы организуют совместную деятельность по выстраиванию взаимодействия с голосовым помощником, что позволяет, на ранних этапах развития группы, увеличить воспринимаемую сплоченность. Мы приходим к выводу, что невозможность различить голоса говорящих, отследить обращения участников друг к другу и запомнить контекст дискуссии, не позволяющие голосовому помощнику модерировать групповое взаимодействие полноценно, следя за появлением лидера, формированием групповых норм и возникновением конфликтов.

**Ключевые слова:** Человеко-компьютерное взаимодействие, Голосовой помощник, Групповое взаимодействие.

## 1. Введение

Роботы и голосовые помощники всё чаще применяются в ситуациях, требующих мультипользовательского взаимодействия: в семьях, учебных классах и, что более важно — рабочих группах, ориентированных на решение задачи ([2]).

Обзор литературы показывает, что количество исследований, где в качестве объекта выступает взаимодействие группы людей с роботом или голосовым помощником увеличивается с 2006 года ([5, 6]). В основном,

---

<sup>1</sup>*Винокуров Федор Никитич* — к.п.н., старший научный сотрудник Кафедры Социальной психологии, факультета психологии МГУ имени М.В. Ломоносова, email: VinokurovFN@my.msu.ru.

Vinokurov Fedor Nikitch — Postdoctoral fellow, Lead scientist at Psychology faculty, MSU named after M.V. Lomonosov.

<sup>2</sup>*Панов Кирилл Алексеевич* — аспирант, МГУ им. М.В. Ломоносова, email: kirjan\_1997@mail.ru.

Panov Kirill Alekseevich — PhD student, MSU named after M.V. Lomonosov

внимание исследователей сосредоточено на изучении взаимодействия роботов с группой, объединенной решением общей задачи.

Используя антропоморфных роботов и голосовых помощников, зарубежные коллеги рассматривают эффекты включения робота в группу, например, Lee с коллегами приходят к выводу, что продолжительное использование голосового помощника увеличивает воспринимаемую социальную сплоченность ([3]). Strohkorb Sebo с соавторами идут дальше и указывают, что при решении общей задачи голосовой помощник должен обладать некоторыми характеристиками, позволяющими увеличить доверие в группе. Среди таких характеристик — рассказ голосового помощника о себе, шутки и возможность совершить ошибку ([7]).

Авторы допускают сильное упрощение, операционализируя сложный феномен доверия через увеличение обращений членов группы друг к другу. Однако несмотря на это мы можем утверждать, что групповое взаимодействие с роботом становится актуальной одной областью социальной психологии.

Дело не только в том, что взаимодействие группы людей с голосовым помощником внешне отличается от взаимодействия с одним человеком. Из работ Gockley и коллег уже известно, что люди в группе более активно инициируют взаимодействие с голосовым помощником, чем поодиночке ([1]). Дополнительно Leite с коллегами показали, что респонденты более явно демонстрируют эмоциональные состояния при общении с голосовыми помощниками, когда находятся в группе ([4]).

Сложность проектирования голосового помощника заключается в протекании групподинамических процессов: выдвижение лидера, возникновение конфликта между участниками, конструирование группой своих норм. Для выстраивания эффективного взаимодействия между членами группы голосовому помощнику необходимо замечать и направлять представленные процессы.

Основные вопросы, которыми мы задавались во время исследования — с какими сложностями можно столкнуться, если передать модерацию группового взаимодействия голосовому помощнику, и какие эффекты на групповую динамику это окажет?

В рамках Летней Психологической Школы МГУ — 2021 «Мастерская UX-исследований в киберпсихологии» с проектной группой «Голос из машины» мы сосредоточились как на функциональном аспекте проектирования голосового помощника для группы пользователей, так и на групповой динамике при модерации голосовым помощником двух процессов — знакомства и принятия решения.

## 2. Метод

Ключевыми методами для исследования были выбраны наблюдение за групповой динамикой и интервью с испытуемыми после участия в сессии знакомства и принятия группового решения.

Исследование проходило в несколько этапов:

- 1) Для исследования динамики группового взаимодействия были спроектированы навыки голосового помощника.

Изначально процессы знакомства проектной группы и принятия единогласного решения были смоделированы внутри проектной группы, переведены в алгоритм с последовательностью шагов и логикой переходов между шагами, после чего трансформированы в навык голосового помощника «Алиса».

- 2) Спроектированные навыки голосового помощника были неоднократно протестированы для учета возможных вариантов ветвлений алгоритма диалога.
- 3) В 3 группах по 4 респондента в каждой моделировались процессы знакомства и принятия решения, модулируемые голосовым помощником.

Группы формировались искусственно из участников Летней Школы. Во время процессов знакомства и принятия решения фиксировались поведенческие реакции участников группы, направленные друг на друга и на голосового помощника. После исследования респонденты принимали участие в интервью, в которых сообщали о своих впечатлениях от процесса, описывали стиль модерации голосового помощника и восприятие остальных членов группы.

## 3. Результаты

- Для членов группы основными преимуществами модерации голосовым помощником выступили:
  - 1) Обеспечение группы специальными знаниями, которые помогут познакомиться и принять единогласное решение;
  - 2) Поддержание в группе “горизонтальной” структуры без выделенных организаторов взаимодействия;
- Вовлеченность респондентов снижалась из-за ощущения искусственности процесса. Это наблюдалось в моменты повторяемых

действий. Например, в моменты, когда участникам было необходимо представиться по очереди; когда каждый участник произносил комплимент другому; когда необходимо произнести определенную фразу-триггер для запуска следующего этапа процесса.

- Технические ограничения приводили к увеличению актов кооперативного взаимодействия между участниками:
  - Если участник забывал правила, то другие участники стремились их объяснить, вместо повторного озвучивания скрипта голосовым помощником.
  - Непонимание голосовым помощником фраз участников создавало ситуацию обоснованности более явного проявления эмоций со стороны члена группы. Это поддерживалось другими смехом и приводило к увеличению вербальных контактов между участниками и снятию эмоционального напряжения (увеличение числа открытых поз, повышение частоты спонтанных высказываний, направленных на другого, смех).
  - В процессе знакомства и принятия решения у группы возникала дополнительная общая цель - понять инструкции голосового помощника и научиться взаимодействовать с ним. Участники совместно организовывали взаимодействие с голосовым помощником и даже распределяли роли — кто лучше запомнил инструкцию и может её озвучить другим, а также кто будет сообщать следующую команду голосовому помощнику. Иными словами, участники включались в дополнительную совместную деятельность, которая, на ранних этапах взаимодействия, помогла увеличить воспринимаемую сплоченность.

## 4. Вывод

Технические ограничения при проектировании навыков голосового помощника, такие как: невозможность различения голосов говорящих; отслеживание обращений одного участника к другому; невозможность запоминания контекста, например, чтобы после поиска недостающей информации в интернете вернуться к текущему шагу взаимодействия, не позволяют создать плавный процесс, алгоритмичность которого была бы скрыта и не снижала вовлеченность участников.

Недостаточно развитая способность голосового помощника понимать естественную речь создавала повод для проявления эмоций членами группы и приводила к снятию эмоционального напряжения. Члены группы объединялись вокруг общей деятельности по выстраиванию взаимо-

действия с голосовым помощником, что являлось главным фактором, опосредствующим восприятие другого в группе.

Дальнейшее развитие технологии голосовых помощников позволит обеспечить доступность и широкое применение накопленных социальными психологами знаний о модерации группового взаимодействия.

## **The Great Equalizer. Can a voice assistant moderate group interaction?**

**Vinokurov F.N., Panov K.A.**

In recent years a new field of study has appeared in social psychology. It concerns voice assistants that contribute to major changes in our society during its relatively brief existence. They are being increasingly used in situations that require multi-user interaction: in families, classrooms and, more importantly, in task-oriented workgroups.

This study analyzes a process of group interaction moderation by a voice assistant. The algorithmic repetition of the voice assistant's lines, noticeable to the group members, reduces involvement in the interaction process. Due to technical limitations the members of the group organize collective activities to build interaction with the voice assistant. This allows to increase the perceived cohesion in the early stages of group development.

This study analyzes a process of group interaction moderation by a voice assistant. The algorithmic repetition of the voice assistant skill, noticeable to the group members, reduces involvement in the interaction process. However, due to technical limitations members of the group organize their joint activities to better interact with the voice assistant. This allows to increase the perceived cohesion in the early stages of group development.

*Keywords:* Human-computer interaction, Voice assistant, Group interaction.

## **References**

- [1] Gockley R., Forlizzi J., Simmons R., "Interactions with a moody robot", *Proceedings of the 1st ACM SIGCHI/SIGART conference on Human-robot interaction*, 2006, 186–193.
- [2] Hinds P. J., Roberts T. L., Jones H., "Whose job is it anyway? A study of human-robot interaction in a collaborative task", *Human-Computer Interaction*, **19** (2004), 151–181.
- [3] Lee K., Lee K. Y., Sheehan L., "Hey Alexa! A magic spell of social glue?: Sharing a smart voice assistant speaker and its impact on users' perception of group harmony", *Information Systems Frontiers*, **22** (2020), 563–583.
- [4] Leite, Iolanda, et al., "Comparing models of disengagement in individual and group interactions", *2015 10th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI). IEEE*, 2015.

- [5] Sebo S. et al., “Robots in groups and teams: a literature review”, *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, **4** (2020), 1–36.
- [6] Sebo S. et al., “The Influence of Robot Verbal Support on Human Team Members: Encouraging Outgroup Contributions and Suppressing Ingroup Supportive Behavior”, *Frontiers in Psychology*, **11** (2020), 3584.
- [7] Strohkorb Sebo S. et al., “The ripple effects of vulnerability: The effects of a robot’s vulnerable behavior on trust in human-robot teams”, *Proceedings of the 2018 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, 2018, 178–186.



# Этическое регулирование технологий ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Н. Ю. Ключева<sup>1</sup>

В сообщении речь пойдет об этико-прикладных проблемах создания и использования технологий искусственного интеллекта. Рассматриваются существующие этические кодексы, регламентирующие сферу искусственного интеллекта и их ключевые принципы.

**Ключевые слова:** искусственный интеллект, философия техники, прикладная этика

Искусственный интеллект, понимаемый как область компьютерных наук, которая занимается созданием программ и компьютеров, имитирующих когнитивные функции человека и способных проявлять разумное поведение, имеет на настоящий момент результаты как в теоретической сфере, так и в области разработки и применения конкретных инновационных технологий.

Причины, по которым задача этико-правового регулирования процессов разработки и использования технологий искусственного интеллекта на национальном и международном уровне является приоритетной, включает принципиальную новизну некоторых аспектов этих технологий: автономность систем в области принятия решений; непрозрачность принципов принятия решений. Отдельный аспект этических вопросов связан с такой особенностью некоторых систем искусственного интеллекта как обучение на массиве данных. Тестирование систем на основе технологий искусственного интеллекта и реальная практика их применения показывают, что обучение на массиве данных может привести к ошибкам и дискриминации, в основе которых лежит несовершенство самого массива. Целый ряд вопросов этического характера связан с прогностической направленностью задач, которые призваны решать системы искусственного интеллекта. Довольно остро этико-прикладные вопросы применения технологий искусственного интеллекта проявляются в таких социально значимых сферах общественной жизни, как медицина и здравоохранение, государственное управление и образование. В этих областях этические вопросы традиционно играют большую роль, при этом внимание общественности к соблюдению принципов справед-

---

<sup>1</sup> Ключева Наталья Юрьевна — доцент философского ф-та МГУ, e-mail: Klyueva.msu@gmail.com.

Klyueva Natalia Yurievna — associate professor, Faculty of Philosophy, Lomonosov Moscow State University

ливости, ответственности за принятые решения, и прозрачности работы максимально высоко.

Попытка представить базовый этический стандарт регулирования технологий искусственного интеллекта сделана в «Первом проекте рекомендаций об этических аспектах искусственного интеллекта» ЮНЕСКО [1]. Документ призван зафиксировать базовые ценностные установки искусственной интеллектуальной системы, среди которых уважение, защита и поощрение человеческого достоинства, прав человека и основных свобод; благополучие окружающей среды и экосистем; обеспечение разнообразия и инклюзивности; поощрение мира и согласия. В РФ также разработаны этические рекомендации по использованию ИИ. Самым масштабным на сегодняшний день является «Кодекс этики в сфере искусственного интеллекта», который был подписан в октябре 2021 года [2]. Человеко-ориентированный подход в создании и реализации ИИ, зафиксированный в документе, основывается на схожих ценностных ориентирах, что и проект ЮНЕСКО. В числе ключевых задач: контроль за соответствием закону, за соблюдением принципа уважения свободы воли человека, за отсутствием дискриминации, за оценкой рисков, безопасностью данных и информационной безопасностью, включая принцип подконтрольности ИИ человеку и отказ от передачи ИИ полномочий ответственного нравственного выбора. Несмотря на отказ ИИ в моральной субъектности, рост использования технологии ИИ будет приводить к трансформации понимания принципов распределения ответственности между машиной и человеком. Соблюдение указанных в документе принципов предполагается в добровольном порядке и связывается участниками с категорией социальной ответственности технологических компаний, компаний-разработчиков. Представляется, что для полноценного этического регулирования развивающейся сферы ИИ требуется включение документов этического регулирования в национальную программу развития ИИ на государственном уровне, что позволит минимизировать влияние коммерческих интересов в данном процессе.

## Список литературы

- [1] *Report «First draft of the Recommendation on the Ethics of Artificial Intelligence»*, 2020, <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000373434>.
- [2] *Кодекс этики в сфере искусственного интеллекта*, 2021, <https://www.aiethic.ru/code?fbclid=IwAR2uavuwQ8icTApgyER42IjpvnfHzMo8kuEnjx5OzSZItPFPV3Bp8oJFNQ>.

## Ethical regulation of artificial intelligence technologies Klyueva N.Y.

The message will focus on ethical and applied problems of creating and using artificial intelligence technologies. Existing ethical codes regulating the field of artificial intelligence and their key principles are considered.

**Keywords:** artificial intelligence, philosophy of technology, applied ethics

## References

- [1] *Report «First draft of the Recommendation on the Ethics of Artificial Intelligence»*, 2020, <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000373434>.
- [2] *Code of Ethics for Artificial Intelligence*, 2021 (Russian), <https://www.aiethic.ru/code?fbclid=IwAR2ua-vuwQ8icTApgyER42IjpvnfHzMo8kuEnjx5OzSZItPFPV3Bp8oJFNQ>.

# Перспективы и ограничения нейросетевых моделей в нейронауках

А. А. Онучин<sup>1</sup>

Нейросетевые модели — стремительно набирающий популярность метод исследования и описания сложных мозговых процессов. Именно поэтому вопрос биологического правдоподобия и реалистичности подобных моделей является крайне актуальным. В данной работе мы обсудим существующие нейросетевые модели и примеры нейробиологического моделирования на их основе. **Ключевые слова:** искусственные нейросети, моделирование сложных систем, вычислительные нейронауки

## 1. Введение

В когнитивных теориях были популярны ‘блочные’ модели. Это идея, навеянная компьютерной архитектурой фон Неймана, укоренилась на десятилетия в репертуаре большинства исследователей. ‘Блоки’ соответствуют функциональным модулям в нервной системе (НС) (например, звуковому восприятию), а стрелки между ними указывают на направление и порядок информационных взаимодействий. Подобные модели получались на основе данных поведенческих корреляционных исследований со здоровыми испытуемыми - например, в задачах по исследованию различий восприятия речи и других звуков, это послужило основой для выделения различных модулей восприятия речи и восприятия нелингвистических акустических стимулов. Хотя некоторые из этих моделей были уточнены в исследованиях на людях с неврологическими нарушениями, большая их часть формулировалась без какой бы то ни было оглядки на нейробиологию мозга.

Значимым шагом к более строгой формулировке моделей такого типа было создание *локальных нейросетевых моделей* (ЛН), заполнивших ‘блоки’ одиночными искусственными нейронами, которые, как предполагалось, могут локально описывать содержание опыта. Взаимнооднозначное соответствие между искусственными нейронами и функциональными модулями делает крайне элементарным переход от блочных моделей к нейросетевым, однако, предположение о том, что отдельные нейроны могут быть ответственны за целостные функции не выдерживает

---

<sup>1</sup> Онучин Арсений Андреевич — студент 5-го курса ф-та Психологии МГУ, e-mail: arseniyonuchin04.09.97@gmail.com.

Onuchin Arsenii Andreevich — 5th year student, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Psychology

никакой критики [1]. Помимо этого, подобные модели не позволяют моделировать процессы обучения и не дают никакой динамики поведения моделируемой системы.

## 1.1. Аттракторные нейросетевые модели

Благодаря нейроанатомическим исследованиям стало ясно, что связи в коре характеризуются высокой плотностью внутренних контактов и множественными повторами межнейрональных связей. Это позволило предположить, что такая архитектура связана с ассоциативной памятью, что послужило основой для создания семейства моделей называемых *аттракторными нейросетями* (АН). В АН нейроны контактируют с большинством нейронов сети, что разительно отличается от архитектуры, используемой в стандартных искусственных нейросетях. Реализация процессов обучения в АН основана на правиле Хебба. Согласно ему, связь усиливается там, где пресинаптический нейрон активируется в некотором временном окне до активации постсинаптического нейрона и наоборот. Данное правило реализуется механизмами долговременной потенциации и долговременной депривации в мозге. Предполагается, что нейронные цепи и циклы, сформированные в процессе обучения, функционируют как распределенные сетевые представления перцептивных, когнитивных или «смешанных» состояний. Следовательно, то, что корковые нейроны работают совместно в группах [1] и что функционально они распределены по тем же группам, может быть смоделировано АН. Это позволяет моделировать процессы памяти и обучения, что было невозможно в ЛН.

В АН возможна полная активация нейронального ансамбля, за счет лишь частичной стимуляции (аналогично гештальту): восприятие объекта возможно по его части. Подобная устойчивость достигается за счет сетевой архитектуры, которая стремится вернуться к заученному состоянию. Например, сеть Хопфилда позволяет моделировать механизмы ассоциативной памяти. Экспериментальные данные показывают, что даже при половине вышедших из строя нейронов в ней вероятность правильного ответа на стимул стремится к 1. Сеть Хопфилда полносвязна и состоит из  $N$  нейронов. В каждый момент времени  $t$  всякий нейрон может находиться в одном из двух состояний  $S_i(t) \in \{-1, 1\}$ , ответственных за модельное ‘возбуждение’ и ‘торможение’. Динамика  $i$ -го нейрона описывается дискретной динамической системой  $S_i(t) := \text{sign}[\sum_{j=1}^N J_{i,j} S_j(t-1)]$ , где  $J_{i,j}$  — матрица весовых коэффициентов, определяющих взаимодействие  $i, j$  нейронов. При этом в сети отсутствуют петлевые связи:  $J_{i,i} = 0$ . Обучение такой сети сводится к задаче минимизации некоторого функционала и подбору значений матрицы  $J$ .

АН могут быть использованы для моделирования широкого спектра нейробиологических феноменов и когнитивных процессов: от распознавания до поиска пути.

## 1.2. Многослойные персептроны

В отличие от АН, где сеть имела вид полного графа, в случае с *многослойными персептронами* (МП) архитектура сводится к наличию контактов только между нейронами из соседних слоёв. Такие сети состоят из нейронов соединённых последовательно, слой за слоем. Всего слоёв выделяют три: входной, скрытый и выходной, что навеянно нейроанатомией сетчатки.

Такие модели дают представление объектов ‘плотно’ упакованным и не разреженным: они распределены по всем нейронам скрытого слоя и *вектор активации* по всему слою является нейросетевым аналогом объекта. Плотное распределение сигнала по сети разительно отличается от того, что мы видим в АН. Обучение реализуется методом градиентного спуска, когда после каждого прохождения сигнала через сеть результат сверяется с эталоном, считается мера ошибки и относительно нее корректируются все веса в сети.

По мере обнаружения ограничений данной модели для реализации механизмов памяти, было предложено добавлять в архитектуру дополнительные слои, что расширяет потенциальную применимость в моделировании когнитивных процессов.

## 1.3. Глубокие нейросетевые модели

Дальнейшее развитие пошло по пути увеличения числа слоев в МП, что получило развитие в теории глубоких нейросетей (ГН). Нейробиологическая мотивация, стоящая за идеей роста числа слоёв состоит в схожести с нейроанатомической архитектурой зрительной коры.

ГН претерпели череду эволюций, приведших к появлению несовпадающих архитектур. Например, появились сверточные нейросети, которые включают топографические проекции между (не обязательно всеми) слоями сети, чтобы упрощать процесс обработки смежных входных данных: для различных нейронов выходного слоя используются одна и та же матрица весов, которую также называют *ядром свёртки*, что отличается от наборов индивидуальных весов у каждого нейрона в стандартной модели глубокой нейросети. Подобные улучшения и модификации структуры многослойного персептрона позволили достичь человеческого уровня (качественного) решения таких задач, как классификация объектов или распознавание речи.

О проблемах. Узконаправленность ГН и невозможность сочетать несколько разномодальных задач в одной сети. ГН склонны к неуместным обобщениям, например, в задачах классификации, выдавая ответ на сильно зашумленных и неидентифицируемых данных [3]. Существует целая серия работ о неустойчивости подобных моделей к некоторым незначительным пертурбациям и шумам во входных данных, которые человек с легкостью бы отфильтровал [2]. Такие сети не имеют динамики и активируются также плотно, как и обычные МП, чем отличаются от разреженной работы мозга.

## Список литературы

- [1] Abeles M., “Corticonics: Neural circuits of the cerebral cortex.”, *Cambridge University Press*, 1991.
- [2] Carlini N., Wagner D., *Towards evaluating the robustness of neural networks*, 2017 ieeе symposium on security and privacy (sp), 2017, 39-57 с.
- [3] Nguyen A., Yosinski J., Clune J., “Understanding neural networks via feature visualization: A survey”, *Springer*, 2019, 55-76

### **Perspectives and constraints on neural network models of neurobiological processes** **Onuchin Arsenii Andreevich**

Artificial and natural neural network models are a new toolkit which could be potentially have been used for clarifying of complex brain functions. To attend this goal, such models need to be neurobiologically realistic. In this work we discuss different types of neural models and also identify aspects under which their biological credibility can be improved.

*Keywords:* neural networks, complex systems modeling, computational neuroscience.

## References

- [1] Abeles M., “Corticonics: Neural circuits of the cerebral cortex.”, *Cambridge University Press*, 1991
- [2] Carlini N., Wagner D., *Towards evaluating the robustness of neural networks*, 2017 ieeе symposium on security and privacy (sp), 2017, 39-57 с.

- [3] Nguyen A., Yosinski J., Clune J., “Understanding neural networks via feature visualization: A survey”, *Springer*, 2019, 55-76



# Проблемы разработки систем Гибридного Интеллекта <sup>1</sup>

А. П. Рыжов<sup>2</sup>

В докладе дается описание концепции человеко-компьютерных интеллектуальных систем (систем гибридного интеллекта), основных проблем их разработки, приводятся примеры таких систем для организаций международного, федерального и корпоративного уровней. Основное внимание уделяется аналитическим возможностям таких систем. Приводятся формулировки прямой и обратных задач. Показывается, что, в отличие от стандартной OLAP аналитики (анализ прошлого) и от аналитики data mining (прогнозирование будущего), такие системы позволяют конструировать будущее. В частности, понимать, что и как надо поменять в анализируемой системе, чтобы достичь максимального эффекта в рамках заданного бюджета и/или как достичь заданного эффекта при минимальном бюджете. Такие особенности систем гибридного интеллекта позволяют использовать их в широком классе задач управления социально-экономическими процессами и социально-техническими системами.

## 1. Введение

Актуальность темы доклада определяется сложившимся положением дел в области практического использования систем Искусственного Интеллекта (ИИ): большинство проектов (по разным оценкам до 80%) не достигает своих целей, большинство ожиданий от использования ИИ не оправдываются. Одной из главных причин сложившейся ситуации является слабое взаимодействие ИИ и пользователя, обусловленное закрытостью алгоритмов ИИ и отсутствием интерфейсных решений «человеческий интеллект - ИИ». Актуальность подтверждается ведущими аналитическими центрами, например:

- NSF выделил 10 прорывных направлений [1], первое из которых "Future of Work at the Human-Technology Frontier" [2] (... «build the

---

<sup>1</sup>Исследование выполнено при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Мозг, когнитивные системы, искусственный интеллект»

<sup>2</sup>Рыжов Александр Павлович — доктор технических наук, профессор МГУ имени М.В. Ломоносова механико-математический факультет кафедра математической теории интеллектуальных систем, e-mail: ryjov@mail.ru.

Ryjov Alexander Pavlovich — Sc.D. in engineering, Ph.D. in mathematics, MBA, professor, Moscow State University, Faculty of Mechanics and Mathematics, Mathematical Theory of Intelligent Systems departments.

human-technology relationship»; «design new technologies to augment human performance» ...);

- DARPA объявила третью волну ИИ [3] (... «DARPA research and development in human-machine symbiosis sets a goal to partner with machines»);
- Национальная стратегия США в области ИИ [4] Стратегия 2 также о гибридном интеллекте: «Strategy 2: Develop effective methods for human-AI collaboration. Increase understanding of how to create AI systems that effectively complement and augment human capabilities». Создаются исследовательские центры в ведущих университетах и компаниях, ориентированные на решение указанной проблемы (например, Stanford [5], Google [6]).

## 2. Основные результаты

Схема систем гибридного интеллекта представлена на Рис. 1.



Рис. 1. Схема системы гибридного интеллекта.

В рамках этой схемы возникают две основные проблемы.

**Проблема 1.** Можно ли, учитывая некоторые особенности восприятия человеком объектов реального мира и их описания, сформулировать правило выбора оптимального множества значений признаков, по которым описываются эти объекты? Возможны два критерия оптимальности:

- Критерий 1. Под оптимальными понимаются такие множества значений, используя которые человек испытывает минимальную неопределенность при описании объектов.
- Критерий 2. Если объект описывается некоторым количеством экспертов, то под оптимальными понимаются такие множества значений, которые обеспечивают минимальную степень рассогласования описаний.

**Проблема 2.** Как мы обрабатываем описания объектов, данные людьми (например, ищем, обобщаем, распознаем)? Можем ли мы оптимизировать эти процессы? В частности, можно ли определить показатели качества поиска информации в нечетких (лингвистических) базах данных и сформулировать правило выбора такого множества лингвистических значений, использование которого обеспечивало бы максимальные показатели качества поиска информации?

В докладе приводятся решения сформулированных проблем. По проблеме 1:

- Показано, что мы можем сформулировать метод выбора оптимального множества значений качественных признаков.
- Более того, показано, что такой метод является устойчивым, то есть возможные при построении функций принадлежности естественные маленькие ошибки не оказывают существенного влияния на выбор оптимального множества значений.
- Множества, оптимальные по критериям 1 и 2 совпадают.

По проблеме 2:

- Показано, что можно ввести показатели качества поиска информации в нечетких (лингвистических) базах данных и формализовать их.
- Показано, что возможно сформулировать методику выбора оптимального множества значений качественных признаков, которое обеспечивает максимальные показатели качества поиска информации.
- Более того, показано, что такая методика является устойчивой, то есть возможные при построении функций принадлежности естественные маленькие ошибки не оказывают существенного влияния на выбор оптимального множества значений.

Решение проблем позволяет разрабатывать оптимальные системы гибридного интеллекта. В докладе приводятся примеры разработанных систем гибридного интеллекта в областях соблюдения международных договоренностей в ядерной области, здравоохранении, микроэлектронике [7]. Такие системы позволяют решать как прямые (оценка влияния изменения некоторого параметра на состояние процесса), так и обратные задачи (достижение максимального эффекта в рамках заданных ограничений и достижение заданного эффекта в рамках минимальных ограничений), которые также обсуждаются в докладе.

## Список литературы

- [1] “NSF’s 10 Big Ideas”, [https://www.nsf.gov/news/special\\_reports/big\\_ideas/index.jsp](https://www.nsf.gov/news/special_reports/big_ideas/index.jsp).
- [2] “Future of Work at the Human-Technology Frontier”, [https://www.nsf.gov/news/special\\_reports/big\\_ideas/human\\_tech.jsp](https://www.nsf.gov/news/special_reports/big_ideas/human_tech.jsp).
- [3] “DARPA AI Next Campaign”, <https://www.darpa.mil/work-with-us/ai-next-campaign>.
- [4] “National AI Research and Development Strategic Plan 2019 Update”, <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2019/06/National-AI-Research-and-Development-Strategic-Plan-2019-Update-June-2019.pdf?fbclid=IwAR3qk0nDr8-sGAqaJnch2m8-asO1JS1D9DjvapEEBth2CA9y5M6-thfhKIY>.
- [5] “Stanford Institute for Human-Centered AI (HAI) in 2019: to guide and build the future of AI”, <https://hai.stanford.edu/>.
- [6] “Google’s AI Institute Will Explore Human - AI Interactions”, <https://analyticsindiamag.com/googles-5-mn-funded-ai-institute-will-explore-human-ai-interactions/>.
- [7] Alexander Ryjov, “Hybrid Intelligence Framework for Augmented Analytics. Intelligent Analytics with Advanced Multi-Industry Applications, edited by Zhaohao Sun, IGI Global”, 22–45 <http://doi:10.4018/978-1-7998-4963-6.ch002>.

### **Problems of Hybrid Intelligence Systems Development Ryjov A.P.**

The report describes the concept of human-computer intelligent systems (hybrid intelligence systems), the main problems of their development, provides examples of such systems for organizations at the international, federal, and corporate levels. The focus is on the analytical capabilities of such systems. Formulations of direct and inverse problems are given. It is shown that, in contrast to standard OLAP analytics (analysis of the past) and from data mining analytics (forecasting the future), such systems allow constructing the future. In particular, understand what and how should be changed in the analyzed system to achieve the maximum effect within a given budget and / or

how to achieve a given effect with a minimum budget. Such features of hybrid intelligence systems make it possible to use them in a wide class of problems of managing socio-economic processes and socio-technical systems.

## References

- [1] “NSF’s 10 Big Ideas”, [https://www.nsf.gov/news/special\\_reports/big\\_ideas/index.jsp](https://www.nsf.gov/news/special_reports/big_ideas/index.jsp).
- [2] “Future of Work at the Human-Technology Frontier”, [https://www.nsf.gov/news/special\\_reports/big\\_ideas/human\\_tech.jsp](https://www.nsf.gov/news/special_reports/big_ideas/human_tech.jsp).
- [3] “DARPA AI Next Campaign”, <https://www.darpa.mil/work-with-us/ai-next-campaign>.
- [4] “National AI Research and Development Strategic Plan 2019 Update”, <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2019/06/National-AI-Research-and-Development-Strategic-Plan-2019-Update-June-2019.pdf?fbclid=IwAR3qk0nDr8-sGAqaJnch2m8-asO1JS1D9DjvapEEBth2CA9y5M6-thfhKIY>.
- [5] “Stanford Institute for Human-Centered AI (HAI) in 2019: to guide and build the future of AI”, <https://hai.stanford.edu/>.
- [6] “Google’s AI Institute Will Explore Human - AI Interactions”, <https://analyticsindiamag.com/googles-5-mn-funded-ai-institute-will-explore-human-ai-interactions/>.
- [7] Alexander Ryjov, “Hybrid Intelligence Framework for Augmented Analytics. Intelligent Analytics with Advanced Multi-Industry Applications, edited by Zhaohao Sun, IGI Global”, 22–45 <http://doi:10.4018/978-1-7998-4963-6.ch002>.

# Какими нас делает Искусственный Интеллект: беззаботными или безработными?

Е. Д. Садовская<sup>1</sup>, Ф. Н. Винокуров<sup>2</sup>

В данной работе обсуждаются результаты эксплораторного этапа (первого из трех) исследования социальных представлений молодежи об Искусственном интеллекте (ИИ). Наша работа основана на теории социальных представлений Московиси[11]. Были проведены интервью ( $N = 14$ ), наблюдения ( $N = 14$ ) и собраны свободные ассоциации на тему ИИ ( $N = 127$ ). Цель данного этапа - обозначить карту общих значений, связанных с ИИ. Наиболее ярко выраженными оказались темы, описанные ниже.

- 1) Представления о будущем с ИИ: одновременно сосуществуют сценарии катастрофы с безработицей и сценарии свободного, творческого и беззаботного будущего для человека.
- 2) Размышления о “не-человечности” ИИ.
- 3) Деление сфер применения на допустимые для использования ИИ и недопустимые.

Следующими шагами данного исследования станут анализ медиа на выявление новых и подтверждение проявившихся тем; анализ позиционирования этих тем.

**Ключевые слова:** Искусственный интеллект, Взаимодействие Человек-ИИ, Теория социальных представлений

## 1. Введение

Внедрение технологии Искусственного Интеллекта (ИИ) в ежедневную рутину происходит стремительно. ИИ используется в сферах транспорта[8], медицины[9], развлечений, психотерапии[10]. Теперь, когда ИИ так сильно проник в жизни обычных людей, его активно начали рассматривать и сквозь призму психологической науки. В работах на стыке психологии и ИИ появляются новые направления. *Human-AI*

---

<sup>1</sup> Садовская Екатерина Дмитриевна — аспирант каф. социальной психологии, факультета психологии МГУ имени М.В. Ломоносова, e-mail: ed.sadovskaya@gmail.com.

Sadovskaya Ekaterina Dmitrievna — graduate student, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Psychology, Chair of Social Psychology.

<sup>2</sup> Винокуров Федор Никитич — к.п.н., ст.н.с. Кафедры Социальной психологии, факультета психологии МГУ имени М.В. Ломоносова, e-mail: VinokurovFN@my.msu.ru .

Vinokurov Fyodor Nikitich — PhD, Senior Researcher, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Psychology, Chair of Social Psychology.

*Interaction*[4], *Отношение* к ИИ у россиян, перспективы психологических исследований. Технофобия и Технофилия и ее предикторы[2, 3], возможности применения технологии ИИ для диагностики в клинической психологии и психиатрии[7]. Стереотипы и установки, отраженные в данных, на основе которых обучается ИИ[5]

В нашей работе мы рассматриваем ИИ в контексте социальной психологии, как объект социального представления. ИИ уже не новая технология, но именно сейчас, в эпоху Big Data, он появляется в центре повседневной социальной жизни человека и порождает социальные представления.

В рамках Летней Психологической Школы МГУ 2021 — “Мастерская UX-исследований в киберпсихологии” проектной группой “Доверие Искусственному интеллекту (ИИ)” был проведен эксплораторный этап (первый из трех этапов) анализа социальных представлений на тему ИИ у молодежи, основанный на теории социальных представлений[11].

## 2. Метод

Следуя стратегии исследования социальных представлений в Женевской школе[6] на первом этапе важно отобразить дискуссию, где присутствует выпуклость и попытаться реконструировать общее поле этой дискуссии[1].

Наше исследование проходило в три этапа:

- 1) Сбор свободных ассоциаций на “Искусственный интеллект”.
- 2) Интервью на тему восприятия ИИ
- 3) Наблюдение в ситуации решения задач во взаимодействии с технологией, основанной на ИИ. Конкретной технологией в данном этапе был Голосовой помощник(ГП): Алиса (Яндекс), Маруся (Mail.ru) и Siri (Apple). Данный выбор обусловлен распространенностью знания о ГП и доступностью в использовании (не требуется специальных знаний и оплаты). В рамках наблюдения фиксировались реакции и рассуждения на тему взаимодействия с ГП и выполнения с помощью него определенного набора команд: поиск новостей, управление музыкой, уточнение вопроса, попытка диалога и игра.

Выборка на первом этапе выборка составила 127 человек, 80% женщин, 20% мужчин. Возраст от 16 до 29. На втором и третьем - 14 человек. К участию привлекались по большей части студенты психологи в возрасте от 18 до 26 лет. 11 женщин и 3 мужчины.

### 3. Результаты

В ходе интервью и наблюдения были выделены следующие темы, затрагиваемые респондентами:

- соотношение человек и ИИ, может ли ИИ имитировать эмпатию и эмоции;
- разделение сфер применения технологии ИИ на те, в которых респондент готов к взаимодействию с ним и те, в которых не готов;
- представление будущего в двух полярных сценариях при одних и тех же вводных. На примере работы:
  - ИИ захватывает человечество, отнимает работу, оставляет людей без профессий
  - ИИ служит верным помощником, берет на себя рутинные задачи и дает пространство для творчества человечества

Таблица 1. Топ-10 слов-ассоциаций на словосочетание “Искусственный интеллект”

Слово	Частота употребления
умный	19
современный	17
компьютер	16
робот	15
будущее	14
сложный	13
опасный	11
быстрый	11
компьютерный	11
роботизированный	10

В ходе анализа частотности свободных ассоциации всего было собрано 349 слов-ассоциаций (встретились один и более раз при подсчетах). Наиболее часто встречались “умный”, “современный”, “компьютер”, “робот” и “будущее” (19, 17, 16, 15 и 14 раз соответственно). В целом, наблюдается очень большой разброс вариативности ассоциаций. В ассоциациях так же, как и в интервью всплывает тема невозможности ИИ приблизится к человечности. ИИ - робот, неживой, холодный, компьютерный, технический, искусственный, опасный. Причем некоторые слова данной категории могут нести отталкивающую коннотацию по аналогии



живой-мертвый: холодный, неживой, опасный. Отдельная намечающаяся категория ассоциаций - наполнение, из чего он состоит: нейросети, программирование. Другая наметившаяся в ассоциациях тема - способности и: умный, быстрый, логичный.

В ассоциациях также можно заметить похожий на результаты интервью тренд на два полюса: страшное/пугающее и полезное/помогающее. Одновременно встречаются ассоциации с положительным отношением и с отрицательным. Что говорит нам о той же социокогнитивной выпуклости термина. В текущих реалиях нас посещают фантазии о том, каким будет будущее с ИИ - беззаботным или безработным?

## 4. Выводы

Целью первого эксплораторного этапа нашего исследования было собрать карту общих значений, связанных с ИИ. Были обозначены следующие основные темы: представления о будущем с ИИ, его “не-человечности” и способностях, делении сфер на допустимые для использования ИИ и недопустимые.

Следующими шагами данного исследования планируются: анализ медиа на выявление новых и подтверждение проявившихся тем; анализ позиционирования этих тем.

## Список литературы

- [1] Бовина И. Б., “Стратегии исследования социальных представлений”, *Социологический журнал*, 2011, №3.
- [2] Нестик Т. А., “Внедрение технологий искусственного интеллекта в повседневную жизнь: перспективы исследований”, *Цифровое общество в культурно-исторической парадигме*, ред. Т.Д. Марцинковская, В.Р. Орестовая, О.В. Гавриченко, РГГУ, 2018, 29–35.
- [3] Солдатова Г. У., Нестик Т. А., “Отношение к интернету среди интернет-пользователей: технофобы и технофилы”, *Вестник Московского государственного областного университета*, 2016, №1, Серия: Психологические науки, 54–61.
- [4] Arrieta A. B. et al., “Explainable Artificial Intelligence (XAI)”, *Information Fusion*, **58** (2020), 85–115.
- [5] Caliskan A., Bryson J. J., Narayanan A., “Semantics derived automatically from language corpora contain human-like biases”, *Science*, **356**:6334 (2017), 183–186.
- [6] Clémence A., *Les méthodes des sciences humaines*, Sous la dir S. Moscovici, F. Buschini, Presses Universitaires de France, Paris, 2003.
- [7] Dwyer D. B., Falkai P., Koutsouleris N., “Machine learning approaches for clinical psychology and psychiatry”, *Annual review of clinical psychology*, **14** (2018), 91–118.

- [8] Fridman L. et al, *Mit autonomous vehicle technology study: Large-scale deep learning based analysis of driver behavior and interaction with automation*, **1**, 2017, arXiv: 1711.06976.
- [9] Longoni C., Bonezzi A., Morewedge C. K., “Resistance to medical artificial intelligence”, *Journal of Consumer Research*, **46:4** (2019), 629–650.
- [10] Lucas G. M. et al., “It’s only a computer: Virtual humans increase willingness to disclose”, *Computers in Human Behavior*, **37** (2014), 94–100.
- [11] Moscovici S., *La Psychanalyse: Son image et son public*, Presses Universitaires de France, Paris, 1961.

## **Future with AI: careless or workless** **Sadovskaya E.D., Vinokurov F.N.**

This paper discusses the results of the exploratory stage (the first of three) of the study of social social perceptions of young people about Artificial Intelligence (AI). Our work is based on Moskovisi’s theory of social perceptions[11]. Interviews ( $N = 14$ ) and observations ( $N = 14$ ) were conducted, and free associations were collected on the topic of AI ( $N = 127$ ). The purpose of this step is to map the common meanings associated with AI. The most prominent were the topics described below.

- 1) Ideas about the future with AI: the scenarios of a catastrophe with unemployment and free, creative and carefree future for humans coexist at the same time.
- 2) Reflections on the “non-humanity” of AI
- 3) The division of the areas of application of the use of AI into acceptable and unacceptable.

The next steps of this study will be the analysis of the media to identify new topics, confirmation and analysis of the positioning of these topics.

*Keywords:* Artificial Intelligence, Human-AI interaction, Social representations

## **References**

- [1] Bovina I. B., “Strategii issledovaniya social’nyh predstavlenij”, *Sociologicheskij zhurnal*, 2011, №3 (in Russian).
- [2] Nestik T. A., “Vnedrenie tekhnologij iskusstvennogo intellekta v povsednevnyyu zhizn’: perspektivy issledovaniy”, *Cifrovoe obshchestvo v kul’turno-istoricheskoy paradigme*, eds. T.D. Marcinkovskaya, V.R. Orestovaya, O.V. Gavrichenko, Russian State University for the Humanities, 2018, 29–35 (in Russian).

- [3] Soldatova G. U., Nestik T. A., “Otnoshenie k internetu sredi internet-pol’zovatelej: tekhnofoby i tekhnofily”, *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta*, 2016, № 1, Seriya: Psihologicheskie nauki, 54–61 (in Russian).
- [4] Arrieta A. B. et al., “Explainable Artificial Intelligence (XAI)”, *Information Fusion*, **58** (2020), 85–115.
- [5] Caliskan A., Bryson J. J., Narayanan A., “Semantics derived automatically from language corpora contain human-like biases”, *Science*, **356**:6334 (2017), 183–186.
- [6] Clémence A., *Les méthodes des sciences humaines*, Sous la dir S. Moscovici, F. Buschini, Presses Universitaires de France, Paris, 2003.
- [7] Dwyer D. B., Falkai P., Koutsouleris N., “Machine learning approaches for clinical psychology and psychiatry”, *Annual review of clinical psychology*, **14** (2018), 91–118.
- [8] Fridman L. et al, *Mit autonomous vehicle technology study: Large-scale deep learning based analysis of driver behavior and interaction with automation*, **1**, 2017, arXiv: 1711.06976.
- [9] Longoni C., Bonezzi A., Morewedge C. K., “Resistance to medical artificial intelligence”, *Journal of Consumer Research*, **46**:4 (2019), 629–650.
- [10] Lucas G. M. et al., “It’s only a computer: Virtual humans increase willingness to disclose”, *Computers in Human Behavior*, **37** (2014), 94–100.
- [11] Moscovici S., *La Psychanalyse: Son image et son public*, Presses Universitaires de France, Paris, 1961.

# Диагностика креативности: нейронные сети для анализа графических решений в компьютерном тестировании

И. Л. Углонова<sup>1</sup>, Е. С. Гельвер<sup>2</sup>, С. В. Тарасов<sup>3</sup>, Д. А. Грачева<sup>4</sup>

В докладе исследуются возможности использования нейронных сетей для диагностики креативности. Использование психометрических методов вместе с методами машинного обучения позволило оценить выраженность креативности у 1831 ученика четвертого класса через анализ графических решений, созданных в компьютерной среде. Также на основе применения обученной модели нейронной сети изучается, какой эффект на результаты диагностики креативности оказывают особенности инструкции задания (инструкции, побуждающие и непобуждающие к креативному поведению).

**Ключевые слова:** измерение креативности, нейронные сети, психометрика, анализ изображений.

## 1. Введение

Креативность признается важным навыком для достижения успеха в двадцать первом веке [3]. Традиционно диагностика креативности включает графическое решение задачи, по которому делается вывод о выраженности креативности по заранее установленным критериям. Развитие технологий и современных подходов к тестированию создает возможности для более точной диагностики креативности [4].

---

<sup>1</sup> Углонова Ирина Львовна — научный сотрудник Центра психометрики и измерений в образовании, НИУ «Высшая школа экономики», e-mail: iuglanova@hse.ru  
Uglanova Irina Lvovna — research associate, Higher School of Economics, Centre for Psychometrics and Measurement in Education.

<sup>2</sup> Гельвер Евгений Сергеевич — аналитик, Институт образования, НИУ «Высшая школа экономики», e-mail: evgelver@gmail.com  
Gelver Yevgeny Sergeyeovich — analyst, Institute of Education, Higher School of Economics.

<sup>3</sup> Тарасов Сергей Владимирович — стажер-исследователь Центра психометрики и измерений в образовании, НИУ «Высшая школа экономики», e-mail: svtarasov@hse.ru  
Tarasov Sergey Vladimirovich — trainee researcher, Higher School of Economics, Centre for Psychometrics and Measurement in Education.

<sup>4</sup> Грачева Дарья Александровна — стажер-исследователь Центра психометрики и измерений в образовании, НИУ «Высшая школа экономики», e-mail: dgracheva@hse.ru  
Gracheva Daria Aleksandrovna — trainee researcher, Higher School of Economics, Centre for Psychometrics and Measurement in Education.

В этой работе мы рассматриваем применение методов машинного обучения и нейронных сетей для анализа графических решений для оценки креативности среди учащихся 4 класса. Исследование проводится на примере задания «Монстр» инструмента «4К», разработанного сотрудниками Центра психометрики и измерений в образовании (Лаборатория измерения новых конструкторов и дизайна тестов) Института образования НИУ ВШЭ. Среднее время выполнения задания составляет 10 минут.

В задании «Монстр» тестируемого просят создать несколько монстров в интерактивной компьютерной системе, используя набор элементов (Рис.1). Созданные монстры (графические решения задачи) оцениваются по двум составляющим креативности, согласно концептуальной рамке инструмента, — это оригинальность идеи и детальность проработки идеи [2]. Компьютерное тестирование позволяет автоматически зафиксировать решение тестируемого: количество используемых элементов и их расположение.

В первой части задания участники тестирования видят инструкцию, где их просят создать трех «необычных и удивительных» монстров. Также в процессе выполнения задания на экране присутствует референсный (некреативный) монстр, который напоминает тестируемому о сути задачи: «Я уверен, что по сравнению со мной это будет действительно удивительный монстр». Согласно предыдущим исследованиям, такие инструкции, побуждающие учащихся к проявлению необходимых навыков (креативности) необходимы для повышения качества диагностики [5].

Во второй части задания тестируемых просят построить еще двух монстров без указания на то, что они должны быть необычны. Вместо этого новые монстры должны содержать определенные элементы, отвечающие новой цели. Исследование различий между изображениями монстров, созданными при наличии и отсутствии инструкции, побуждающий к креативному решению, является важным вкладом в валидизацию диагностик креативности в компьютерной форме. В качестве метода исследования мы используем двухэтапный подход к оценке креативности [1].

На первом этапе с помощью методологии латентного классового анализа (Latent Class Analysis, LCA) производится классификация графических решений по уровню выраженности навыков креативности на основе данных тестирования (индикаторов). Примером индикатора является количество элементов в монстре (для детальности), отсутствие симметричности в расположении конечностей (для оригинальности). Результаты LCA являются разметкой для дальнейшего анализа изображений. Следующий этап — обучение алгоритма машинного обучения на размеченных данных. Для данного исследования в качестве алгоритма была выбрана сверточная нейронная сеть (Convolutional neural network, CNN).



Рис. 1. Интерфейс рабочей области построения монстра в задании «Монстр»

В исследовании осенью 2021 года принимали участие 1831 учащихся четвертых классов. Каждый тестируемый создавал по пять монстров, три из них с инструкцией, побуждающей креативное решение. Именно на этих монстрах обучалась нейронная сеть. После удаления профилей с пропущенными значениями по всем индикаторам количество изображений для обучения составило 5301. После чего обученная нейронная сеть применялась для оценки креативности двух монстров, выполненных с другой инструкцией. Полученные результаты позволяют сделать вывод об эффекте прямой инструкции на диагностику креативности среди младших школьников.

Принимая во внимания результаты предыдущих исследований, мы ожидаем, что созданные тестируемыми графические решения при отсутствии побуждения к проявлению креативного поведения окажутся менее оригинальными и детальными, то есть будут маркированы нейронной сетью как некреативные. Применение двухэтапного метода для оценки креативности и в целом методов машинного обучения и нейронных сетей для диагностики креативности является перспективной областью исследования с перспективой генерализации результатов на другие измерительные инструменты в компьютерной форме.

## Список литературы

- [1] Угланова И.Л., Гельвер Е.С., Тарасов С.В., Грачева Д.А., Вывра Е.Е., “Оценивание креативности на основе анализа изображений с помощью нейронных сетей”, *Искусственный интеллект и принятие решений*, **1** (2021), 86–97.
- [2] Угланова И.Л., Орел Е.А., Брун И.В., “Измерение креативности и критического мышления в начальной школе”, *Психологический журнал*, **41:6** (2020).
- [3] Griffin P., Care E., “Assessment and teaching of 21st century skills: Methods and approach”, *Springer*, 2014.
- [4] Shao Z., Yancong L., Wang X., Zhao X., Guo Y., “Research on a New Automatic Generation Algorithm of Concept Map Based on Text Clustering and Association Rules Mining”, *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, **11** (2020), 479–490.
- [5] Ward T.B., “Structured Imagination: The Role of Category Structure in Exemplar Generation”, *Cognitive Psychology*, **27:1** (1994), 1–40.

### **Assessing creativity: using neural networks for analysis of graphical solutions in computer testing**

**Uglanova I.L., Gelver E.S., Tarasov S.V., Gracheva D.A.**

The report explores the possibilities of using neural networks for creativity assessment. The use of both psychometric and machine learning methods allowed us to assess students' creativity skills (the sample is 1831 4-graders) through graphical solutions created in a computer environment. Also, based on a trained neural network model, the influence of instruction in creativity tasks on the results of creativity diagnostics is evaluated.

*Keywords:* creativity assessment, neural networks, image analysis, psychometrics.

## References

- [1] Uglanova I., Gelver E., Tarasov S., Gracheva D., Vyrva E., “Assessing Creativity Using Image Analysis with Neural Networks”, *Iskusstvennyy intellekt i prinyatiye resheniy*, **1** (2021), 86–97 (In Russian).
- [2] Uglanova I., Orel E., Brun I., “Measuring creativity and critical thinking in primary school”, *Psikhologicheskii zhurnal*, **41:6** (2020) (In Russian).
- [3] Griffin P., Care E., “Assessment and teaching of 21st century skills: Methods and approach”, *Springer*, 2014.
- [4] Shao Z., Yancong L., Wang X., Zhao X., Guo Y., “Research on a New Automatic Generation Algorithm of Concept Map Based on Text Clustering and Association Rules Mining”, *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, **11** (2020), 479–490.
- [5] Ward T.B., “Structured Imagination: The Role of Category Structure in Exemplar Generation”, *Cognitive Psychology*, **27:1** (1994), 1–40.

# Заменим ли «ручной труд»: измерение креативности в цифровой среде без привлечения экспертов

И. Л. Угланова<sup>1</sup>, С. В. Тарасов<sup>2</sup>, С. М. Чурбанова<sup>3</sup>, Е. А. Орел<sup>4</sup>

Измерение креативности – актуальная задача для исследователей и практиков. На сегодняшний день в отечественной психологии не существует инструмента измерения креативности в школьном возрасте, реализованного в современном компьютерном формате с автоматической обработкой результатов. Данное исследование демонстрирует, какие перспективы в области психологического тестирования вносят современные компьютерные технологии и тренд к автоматизации.

**Ключевые слова:** компьютерное тестирование, автоматическое оценивание, измерение креативности

Исследование креативности – область, которая имеет давнюю историю в психологических исследованиях. В современном мире креативность рассматривается как один из ключевых навыков [1], учитывается в Международной программе по оценке образовательных достижений учащихся (PISA<sup>5</sup>), а развитие креативности уже включено в федеральные образовательные стандарты<sup>6</sup>. Таким образом, среди исследователей и практиков актуализируется запрос на объективную, валидную и удобную в использовании систему оценивания креативности.

Традиционные инструменты оценки креативности обладают концептуальными ограничениями и трудностями в технической реализации

---

<sup>1</sup> Угланова Ирина Львовна — научный сотрудник Центра психометрики и измерений в образовании, ВШЭ, e-mail: iuglanova@hse.ru

Uglanova I.L — research associate, Higher School of Economics, Centre for Psychometrics and Measurement in Education.

<sup>2</sup> Тарасов Сергей Владимирович — стажер-исследователь Центра психометрики и измерений в образовании, ВШЭ, e-mail: svtarasov@hse.ru

Tarasov S.V. — trainee researcher, Higher School of Economics, Centre for Psychometrics and Measurement in Education.

<sup>3</sup> Чурбанова Светлана Михайловна — доцент Факультета психологии МГУ, e-mail: svetlanatch@mail.ru

Churbanova S.M. — Associate professor, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Psychology.

<sup>4</sup> Орел Екатерина Алексеевна — старший научный сотрудник Центра психометрики и измерений в образовании, ВШЭ, e-mail: eorel@hse.ru

Orel E.A. — senior researcher, Higher School of Economics, Centre for Psychometrics and Measurement in Education

<sup>5</sup> <https://www.oecd.org/pisa/innovation/creative-thinking/>

<sup>6</sup> ФГОС, 2009 <https://fgos.ru/>



[2],[3]. К концептуальным трудностям, например, можно отнести, что задания более абстрактного формата, использующиеся при традиционном бланковом тестировании, могут обладать низкой экологической валидностью – не отражать поведение в более реалистичной ситуации. Как подход к преодолению этой проблемы, предлагается использование заданий в формате, приближенном к увлекательным компьютерным играм.

С технической стороны, традиционные форматы предполагают привлечение экспертов к проверке заданий. Это значительно увеличивает время и ресурсы, затрачиваемые на тестирование – кроме времени, требующегося непосредственно на анализ изображений (которое может достигать нескольких часов для диагностики одного тестируемого), требуется время на подготовку экспертов, время и усилия на организацию их работы, ресурсы на оплату.

Таким образом, в научной и практической области психометрики остается нерешенная проблема – нехватка инструмента измерения креативности, выполненного в компьютерном игровом формате и не требующего привлечения экспертов для оценки результатов. Цель исследования – представить новую методологию для измерения креативности в начальной и основной школе. В работе предложен новый подход к оценке креативности, который дает возможность получить валидные результаты, снижающие затраты при проведении.

Представленная методология автоматизированной оценки креативности включает три части – теоретическая модель креативности, модель заданий (стимульного материала) и модель начисления баллов (согласно логике Evidence-centered Design,[4],[5]). В основе новой теоретической модели лежит систематизация предыдущих исследований креативности [6]. Мы опираемся на разработки теорий Гилфорда [7], Торренса [8] и Уорда [9]. Так, согласно подходу Гилфорда, основу креативности составляют дивергентное мышление и процесс решения задач (problem solving). Тесты Гилфорда и Торренса включают слабо структурированные задачи, требующие выработки большего числа ответов, которые затем оцениваются для определения четырех составляющих креативности: беглости, гибкости, оригинальности и детальности. Модель Уорда направлена на изучение структурного воображения, определяемого базовыми категориями, а творческие инновации более вероятны в ситуации обращения к более широкому рамам знаний.

Теоретическая модель, реализуемая в инструменте, включает две составляющие – оригинальность и детальность. Оригинальность выступает не отличием от наиболее типичного по выборке, а отличием от изначально заданного референса (новые вариации возникают, если полагаться на более общие свойства, например, категории животных и на экологические соображения), что ближе к структурному воображению Уорда, чем

к оригинальности Торренса. Детальность рассматривается как глубина и проработанность элементов [6], шире – как разнообразие информации о категориях в функциональном значении, как расширение функций не в структурном смысле.

Модель заданий включает описание стимульного материала. В формате *computerized performance-based assessment* разработаны задания, которые напоминают компьютерную игру. Контекстуальная насыщенность заданий позволяет преодолеть проблемы экологической валидности, а компьютерная форма открывает перспективы для автоматизированной обработки результатов.

Модель начисления баллов позволяет перевести данные, полученные в ходе тестирования, в интерпретируемые меры выраженности конструкта – баллы. Несмотря на гибкую природу конструкта, для справедливого и валидного оценивания требуется высокий уровень стандартизации – ограничение свободы тестируемых, чтобы сделать результаты их работы сопоставимыми между собой. Мы ограничиваем действия учеников работой с изначально заданными элементами из набора. Согласно этим ограничениям, разработанный инструмент применим только для анализа графических решений.

Например, в задании «Экопарк»<sup>7</sup>, разработанном для измерения креативности в 5 классе, учеников просят собрать изображение из предложенного набора элементов, которое будет максимально не похожем на образец (референс). При выполнении задания тестируемый погружается в более широкий контекст – по сценарию задания, он/она попадает на необычную планету, где можно обустроить экопарк для редких, непохожих на земных, птиц и животных.

Анализ данных строится по тому, какие различия продемонстрировал тестируемый по отношению к референсу. Например, как проявление оригинальности нами рассматриваются новые вариации добавления элементов, не представленных на референсе (крыло или хвост другой формы, плавник). Как проявление детальности оценивается общее количество элементов и использование дополнительных средств (изменение цвета, поворот элементов и др.). Для анализа могут применяться как современные психометрические методы [10], так и двухэтапный процесс, который рассматривает результаты психометрического анализа как источник разметки для анализа изображений с привлечением нейронных сетей [11].

Таким образом, представленная методология учитывает предыдущий опыт изучения креативности и предлагает концептуальные и техниче-

---

<sup>7</sup>Пример является частью инструмента «4К», разработанного сотрудниками Центра психометрики и измерений в образовании (Лаборатория измерения новых конструктов и дизайна тестов) Института образования НИУ ВШЭ.



Рис. 1. Задание «Экопарк»

ские улучшения. Исследование показывает, как современные компьютерные технологии и тренд к автоматизации вносят вклад в область психологического тестирования.

## Список литературы

- [1] Care E., Kim H., “Assessment of twenty-first century skills: The issue of authenticity”, *Assessment and Teaching of 21st Century Skills*, 2018, 21–39.
- [2] Rafner J., Biskjær M.M., Zana B., Langsfjord S., Bergeholtz C., Rahimi S., Carugati A., Noy L., Sherson J., “Digital Games for Creativity Assessment: Strengths, Weaknesses and Opportunities”, *Creativity Research Journal*, 2021, 1–27.
- [3] Said-Metwaly S., Van den Noortgate W., Kyndt E., “Methodological issues in measuring creativity: A systematic literature review”, *Creativity. Theories-Research-Applications*, 4:2 (2017), 276–301.
- [4] Углонова И., Брун И., Васин Г., “Методология Evidence-Centered Design для измерения комплексных психологических конструктов”, *Современная зарубежная психология*, 7:3 (2018), 18–27.

- [5] Mislevy R.J., Almond R.G., Lukas J.F., “A brief introduction to evidence-centered design”, *CSE Report 632. US Department of Education*, **2003**.
- [6] Угланова И.Л., Орел Е.А., Брун И.В., “Измерение креативности и критического мышления в начальной школе”, *Психологический журнал*, **41:6** (2020), 96–107.
- [7] Guilford J. P., *Intelligence, creativity, and their educational implications.*, San Diego, CA: EDITS, 1968.
- [8] Torrance E.P., “The nature of creativity as manifest in its testing”, *Ed. by R. J. Sternberg. // The nature of creativity. New York.: Cambridge University Press*, 1988, 43–75.
- [9] Ward T.B., “Structured imagination: The role of category structure in exemplar generation”, *Cognitive psychology*, **27:1** (1994), 1–40.
- [10] Davier M. von, Khorramdel L., He Q., Shin H.J., Chen H., “Developments in Psychometric Population Models for Technology-Based Large-Scale Assessments: An Overview of Challenges and Opportunities”, *Journal of Educational and Behavioral Statistics*, 2019.
- [11] Угланова И. Л., Гельвер Е. С., Тарасов С. В., Грачева Д. А., Вырва Е. Е., “Оценивание креативности на основе анализа изображений с помощью нейронных сетей”, *Искусственный интеллект и принятие решений*, 2021, № 1, 86–97.

**Can we replace «manual labor»: creativity assessment in a digital environment without the involvement of experts**  
**Uglanova I., Tarasov S., Churbanova S., Orel E.**

Creativity assessment is an urgent task for researchers and practitioners. Nowadays in Russian psychology, there is no instrument for measuring creativity at school age, implemented in a modern computer format with automatic (non-expert-based) scoring. This study demonstrates what perspectives in the field of psychological testing are brought by modern computer technologies and the trend towards automation.

*Keywords:* computer testing, automatic scoring, creativity assessment

# References

- [1] Care E., Kim H., “Assessment of twenty-first century skills: The issue of authenticity”, *Assessment and Teaching of 21st Century Skills*, 2018, 21–39.
- [2] Rafner J., Biskjær M.M., Zana B., Langsfjord S., Bergenholtz C., Rahimi S., Carugati A., Noy L., Sherson J., “Digital Games for Creativity Assessment: Strengths, Weaknesses and Opportunities”, *Creativity Research Journal*, 2021, 1–27.
- [3] Said-Metwaly S., Van den Noortgate W., Kyndt E., “Methodological issues in measuring creativity: A systematic literature review”, *Creativity. Theories-Research-Applications*, 4:2 (2017), 276–301.
- [4] Uglanova I.L., Brun I.V., Vasin G.M., “Evidence-Centered Design method for measuring complex psychological constructs”, *Journal of Modern Foreign Psychology*, 7:3 (2018), 18–27 (In Russian).
- [5] Mislevy R.J., Almond R.G., Lukas J.F., “A brief introduction to evidence-centered design”, *CSE Report 632. US Department of Education*, 2003.
- [6] Uglanova I., Orel E., Brun I., “Measuring creativity and critical thinking in primary school”, *Psikhologicheskii zhurnal*, 41:6 (2020), 96–107 (In Russian).
- [7] Guilford J. P., *Intelligence, creativity, and their educational implications.*, San Diego, CA: EDITS, 1968.
- [8] Torrance E.P., “The nature of creativity as manifest in its testing”, *Ed. by R. J. Sternberg. // The nature of creativity. New York.: Cambridge University Press*, 1988, 43–75.
- [9] Ward T.B., “Structured imagination: The role of category structure in exemplar generation”, *Cognitive psychology*, 27:1 (1994), 1–40.
- [10] Davier M. von, Khorramdel L., He Q., Shin H.J., Chen H., “Developments in Psychometric Population Models for Technology-Based Large-Scale Assessments: An Overview of Challenges and Opportunities”, *Journal of Educational and Behavioral Statistics*, 2019.
- [11] Uglanova I., Gelper E., Tarasov S., Gracheva D., Vyrva E., “Assessing Creativity Using Image Analysis with Neural Networks”, *Iskusstvennyy intellekt i prinyatiye resheniy*, 2021, № 1, 86–97 (In Russian).

Часть 9.  
Представление знаний и  
автоматизация рассуждений

# Towards Relevant Multilattice Logic

O. M. Grigoriev<sup>1</sup>, Y. I. Petrukhin<sup>2</sup>

The paper introduces the concept of de Morgan multimonoid and considers the possibility of constructing a relevant multilattice logic on its basis. The problem of constructing a sequent calculus for it is discussed.

*Keywords:* relevant logic, multilattice logic, multilattice, multimonoid, sequent calculus.

Multilattice logic  $\mathbf{ML}_n$  arose in [4] as a generalisation of bilattice logic, trilattice logic, and tetralattice logic which are themselves generalisations of the logic of De Morgan lattices called first degree entailment, one of the most important relevant logics (see [4] for more details and [1] for the current state of affairs in multilattice logic). The semantics of  $\mathbf{ML}_n$  is based on multilattices, i.e. lattices equipped with  $n$  partial orders. Meet, join, and inversion exist for any for any such order. Thus, a multilattice has  $n$  conjunctions, disjunctions, and negations. In [3]  $\mathbf{ML}_n$  was supplied with  $n$  implications and co-implications. However, the implications added to  $\mathbf{ML}_n$  are classical. Besides, the combination of two negations produced by different orders behaves as a Boolean complementation. Hence,  $\mathbf{ML}_n$  is not a relevant logic, although its roots go back to relevant logic. We think that it is important to return multilattice logic to its motherland, relevant logic. As a solution of this problem, we suggest a combination of  $\mathbf{ML}_n$  and the relevant logic  $\mathbf{R}$ .

[4] A *multilattice* is a structure  $\mathfrak{M}_n = \langle S, \leq_1, \dots, \leq_n \rangle$ , where  $n > 1$ ,  $S \neq \emptyset$ ,  $\leq_1, \dots, \leq_n$  are partial orders such that  $\langle S, \leq_1 \rangle, \dots, \langle S, \leq_n \rangle$  are lattices with the corresponding pairs of meet and join operations  $\langle \cap_1, \cup_1 \rangle, \dots, \langle \cap_n, \cup_n \rangle$  and the corresponding  $j$ -inversion operations  $\sim_1, \dots, \sim_n$  which satisfy the following conditions, for each  $j, k \leq n$ ,  $j \neq k$ , and  $a, b \in S$ :

$$a \leq_j b \text{ implies } \sim_j b \leq_j \sim_j a; \quad (\text{anti})$$

$$a \leq_k b \text{ implies } \sim_j a \leq_k \sim_j b; \quad (\text{iso})$$

$$\sim_j \sim_j a = a. \quad (\text{per2})$$

An Abelian multimonoid is a structure  $\mathfrak{A}_n = \langle S, \circ_1, \dots, \circ_n, 1 \rangle$ , where  $n > 1$ ,  $S \neq \emptyset$ , each  $\circ_j$  ( $j \leq n$ ) is commutative, associative binary operation on  $S$  with 1 its identity, i.e.  $1 \in S$  and  $1 \circ_j a = a$ , for each  $a \in S$ . A de Morgan multimonoid is a structure  $\mathfrak{D}_n = \langle D, \leq_1, \dots, \leq_n, \circ_1, \dots, \circ_n, 1 \rangle$ , where  $n > 1$  and

---

<sup>1</sup>Grigoriev Oleg Mikhailovich — associate professor, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Philosophy, e-mail: grig@philos.msu.ru.

<sup>2</sup>Petrukhin Yaroslav Igorevich — doctoral student, Lodz University, Institute of Philosophy, e-mail: yaroslav.petrukhin@mail.ru.

- 1)  $\langle D, \leq_1, \dots, \leq_n \rangle$  is a multilattice;
- 2)  $\langle D, \circ_1, \dots, \circ_n, 1 \rangle$  is an Abelian multimonoid;
- 3) the multimonoid is ordered by the multilattice, i.e.  $a \circ_j (b \cup_t c) = (a \circ_j b) \cup_t (a \circ_j c)$ , for each  $j, t \leq n$ ;
- 4)  $\circ_j$  is upper semi-idempotent ('square increasing'), i.e.  $a \leq_t a \circ_j a$ , for each  $j, t \leq n$ ;
- 5) for each  $j, t \leq n$ ,  $a \circ_j b \leq_t c$  iff  $a \circ_j \sim_t c \leq_t \sim_t b$  iff if  $j \neq t$ , then  $a \circ_j \sim_j b \leq_t \sim_j c$  (Antilogism);
- 6)  $a \circ_j b \leq_t c$  iff  $a \leq_t b \mapsto_{jt} c$ , for each  $j, t \leq n$ .

Let  $n > 1$  and  $\mathfrak{D}_n = \langle D, \leq_1, \dots, \leq_n, \circ_1, \dots, \circ_n, 1 \rangle$  be a de Morgan multimonoid. The logic **RML** $_n$  is built in a propositional language  $\mathcal{L}$  with the following connectives:  $\neg_j, \wedge_j, \vee_j, \rightarrow_{jt}$ , for each  $j, t \leq n$ . These connectives are interpreted in  $\mathfrak{D}_n$  as follows (where  $v$  is a valuation, i.e. a mapping from the set of all  $\mathcal{L}$ 's propositional variables to  $D$ ):  $v(A \wedge_j B) = v(A) \cap_j v(B)$ ,  $v(A \vee_j B) = v(A) \cup_j v(B)$ ,  $v(A \rightarrow_{jt} B) = v(A) \mapsto_{jt} v(B)$ ,<sup>1</sup>  $v(\neg_j A) = \sim_j v(A)$ . A formula  $A$  is **RML** $_n$ -valid iff  $v(A) \geq_t 1$ , for each de Morgan multimonoid  $\mathfrak{D}_n$ , each valuation  $v$ , and for each  $t \leq n$ .

The axiomatization of the logic **RML** $_n$  determined by de Morgan multimonoids is under the development. As a conjecture, we present the following sequent calculus. It uses Slaney's [5] sequent calculus for the positive fragment of **R** and the additional rules for negations in the spirit of negation rules used in **ML** $_n$  [4, 3] and in Kamide's [2] decidable paraconsistent relevant logic based on the positive fragment of **RW**. We need some terminological preliminaries.

“(1) any formula is a bunch, and (2) for  $n \geq 2$ , if  $X_i$  is a bunch for  $i = 1, \dots, n$ , then both sequences  $(X_1, \dots, X_n)$  and  $(X_1; \dots; X_n)$  are bunches. Bunches of the forms  $(X_1, \dots, X_n)$  and  $(X_1; \dots; X_n)$  are respectively called *intensional* and *extensional*. Each bunch  $X_i$  is called an *immediate constituent* of  $(X_1, \dots, X_n)$  and  $(X_1; \dots; X_n)$ . For the sake of simplicity, we assume that immediate constituents of an intensional (and an extensional) bunch are not intensional (and extensional, respectively). Thus, a bunch of the form  $(X; (Y; Z); W)$  is identified with the bunch  $(X; Y; Z; W)$ . In other words, intensional bunches and extensional bunches must appear alternatively in a given bunch.” [2, p. 179]

---

<sup>1</sup>In each de Morgan multimonoid it holds that  $a \circ_j b \leq_t c$  iff  $a \leq_t \sim_t (b \circ_j \sim_t c)$ . Hence,  $a \leq_t b \mapsto_{jt} c$  iff  $a \leq_t \sim_t (b \circ_j \sim_t c)$ . Also, we have:  $a \leq_t b$  iff  $1 \leq_t a \mapsto_{jt} b$ .



In a usual way, one can define the notions of a *subbunch* and an *occurrence of a subbunch*  $X$  of  $Y$  (such an occurrence is said to be an *indicated bunch occurrence* of  $X$  (in  $Y$ )). We write  $\Gamma(X)$  for an indicated bunch occurrence of  $X$  in  $\Gamma$ . The notion of a sequent is understood as an ordered pair written as  $X \Rightarrow \varphi$  such that  $X$  is a (possibly, empty) bunch and  $\varphi$  is a formula.

Now we are ready to introduce our sequent calculus. In what follows,  $j, k, n$  stands for positive integers such that  $j, k \leq n$  and  $j \neq k$ . The axioms are as follows (for any propositional variable  $p$ ):

$$(Ax) p \Rightarrow p \quad (Ax_j) \neg_j p \Rightarrow \neg_j p$$

The structural rules are as follows:

$$\begin{aligned} (\text{Cut}) \frac{X \Rightarrow \varphi \quad \Gamma(\varphi) \Rightarrow \psi}{\Gamma(X) \Rightarrow \psi} \quad (\text{I-ex}) \frac{\Gamma(X, Y) \Rightarrow \varphi}{\Gamma(Y, X) \Rightarrow \varphi} \quad (\text{I-co}) \frac{\Gamma(X, X) \Rightarrow \varphi}{\Gamma(X) \Rightarrow \varphi} \\ (\text{E-ex}) \frac{\Gamma(X; Y) \Rightarrow \varphi}{\Gamma(Y; X) \Rightarrow \varphi} \quad (\text{E-co}) \frac{\Gamma(X; X) \Rightarrow \varphi}{\Gamma(X) \Rightarrow \varphi} \quad (\text{E-wk}) \frac{\Gamma(X) \Rightarrow \varphi}{\Gamma(X; Y) \Rightarrow \varphi} \end{aligned}$$

The non-negated rules are as follows:

$$\begin{aligned} (\wedge_j \Rightarrow) \frac{\Gamma(\varphi; \psi) \Rightarrow \chi}{\Gamma(\varphi \wedge_j \psi) \Rightarrow \chi} \quad (\Rightarrow \wedge_j) \frac{X \Rightarrow \varphi \quad Y \Rightarrow \psi}{X; Y \Rightarrow \varphi \wedge_j \psi} \\ (\vee_j \Rightarrow) \frac{\Gamma(\varphi) \Rightarrow \chi \quad \Gamma(\psi) \Rightarrow \chi}{\Gamma(\varphi \vee_j \psi) \Rightarrow \chi} \quad (\Rightarrow \vee_j) \frac{X \Rightarrow \varphi_i}{X \Rightarrow \varphi_1 \vee_j \varphi_2} \\ (\rightarrow_{jl} \Rightarrow) \frac{X \Rightarrow \varphi \quad \Gamma(\psi) \Rightarrow \chi}{\Gamma(\varphi \rightarrow_{jl} \psi, X) \Rightarrow \chi} \quad (\Rightarrow \rightarrow_{jl}) \frac{X, \varphi \Rightarrow \psi}{X \Rightarrow \varphi \rightarrow_{jl} \psi} \end{aligned}$$

The  $jj$ - and  $jjl$ -negated logical rules are as follows:

$$\begin{aligned} (\neg_j \wedge_j \Rightarrow) \frac{\Gamma(\neg_j \varphi) \Rightarrow \chi \quad \Gamma(\neg_j \psi) \Rightarrow \chi}{\Gamma(\neg_j(\varphi \wedge_j \psi)) \Rightarrow \chi} \quad (\Rightarrow \neg_j \wedge_j) \frac{X \Rightarrow \varphi_i}{X \Rightarrow \neg_j(\varphi_1 \wedge_j \varphi_2)} \\ (\neg_j \vee_j \Rightarrow) \frac{\Gamma(\neg_j \varphi; \neg_j \psi) \Rightarrow \chi}{\Gamma(\neg_j(\varphi \vee_j \psi)) \Rightarrow \chi} \quad (\Rightarrow \neg_j \vee_j) \frac{X \Rightarrow \neg_j \varphi \quad Y \Rightarrow \neg_j \psi}{X; Y \Rightarrow \neg_j(\varphi \vee_j \psi)} \\ (\neg_j \neg_j \Rightarrow) \frac{\Gamma(\varphi) \Rightarrow \chi}{\Gamma(\neg_j \neg_j \varphi) \Rightarrow \chi} \quad (\Rightarrow \neg_j \neg_j) \frac{X \Rightarrow \varphi}{X \Rightarrow \neg_j \neg_j \varphi} \\ (\neg_j \rightarrow_{jl} \Rightarrow) \frac{\neg_j \psi \Rightarrow Y, \neg_j \varphi}{\neg_j(\varphi \rightarrow_{jl} \psi) \Rightarrow Y} \quad (\Rightarrow \neg_j \rightarrow_{jl}) \frac{X \Rightarrow \neg_j \psi \quad \Gamma(\neg_j \varphi) \Rightarrow}{\Gamma(X) \Rightarrow \neg_j(\varphi \rightarrow_{jl} \psi)} \end{aligned}$$

The  $ljl$ -negated logical rules are as follows:

$$(\neg_l \rightarrow_{jl} \Rightarrow) \frac{\Gamma(\varphi, \neg_l \psi) \Rightarrow \chi}{\Gamma(\neg_l(\varphi \rightarrow_{jl} \psi)) \Rightarrow \chi} \quad (\Rightarrow \neg_l \rightarrow_{jl}) \frac{X \Rightarrow \varphi \quad Y \Rightarrow \neg_l \psi}{X, Y \Rightarrow \neg_l(\varphi \rightarrow_{jl} \psi)}$$

The  $kj$ -negated logical rules are as follows:

$$(\neg_k \wedge_j \Rightarrow) \frac{\Gamma(\neg_k \varphi; \neg_k \psi) \Rightarrow \chi}{\Gamma(\neg_k(\varphi \wedge_j \psi)) \Rightarrow \chi} \quad (\Rightarrow \neg_k \wedge_j) \frac{X \Rightarrow \neg_k \varphi \quad Y \Rightarrow \neg_k \psi}{X; Y \Rightarrow \neg_k(\varphi \wedge_j \psi)}$$

$$\begin{aligned}
(\neg_k \vee_j \Rightarrow) \frac{\Gamma(\neg_k \varphi) \Rightarrow \chi \quad \Gamma(\neg_k \psi) \Rightarrow \chi}{\Gamma(\neg_k(\varphi \vee_j \psi)) \Rightarrow \chi} & \quad (\Rightarrow \neg_k \vee_j) \frac{X \Rightarrow \neg_k \varphi_i}{X \Rightarrow \neg_k(\varphi_1 \vee_j \varphi_2)} \\
(\neg_k \rightarrow_j \Rightarrow) \frac{X \Rightarrow \neg_k \varphi \quad \Gamma(\neg_k \psi) \Rightarrow \chi}{\Gamma(\neg_k(\varphi \rightarrow_j \psi), X) \Rightarrow \chi} & \quad (\Rightarrow \neg_k \rightarrow_j) \frac{\neg_k \varphi, X \Rightarrow \neg_k \psi}{X \Rightarrow \neg_k(\varphi \rightarrow_j \psi)}
\end{aligned}$$

As for the  $\neg_k \neg_j$ , we do not offer any rules, but one may find some option. For example, the rules for  $\neg_k \neg_j$  can be the same as for  $\neg_j \neg_j$  (with the corresponding changes in the algebraic semantics). Atypically for multilattice logic, our calculus has three types (instead of two) of the negation of implication rules. The reason is that not only a multilattice is used, but also a multimonoid.

The research is supported by by RFBR, grant number 20-011-00698 A.

## References

- [1] Grigoriev, O., Petrukhin, Y., “Modal multilattice logics with Tarski, Kuratowski, and Halmos operators”, *Logic and Logical Philosophy*, **30**:3 (2021), 385–415.
- [2] Kamide N., “A decidable paraconsistent relevant logic: Gentzen system and Routley-Meyer semantics”, *Mathematical Logic Quarterly*, **62**:3 (2016), 177–189.
- [3] Kamide N., Shramko S., “Embedding from multilattice logic into classical logic and vice versa”, *Journal of Logic and Computation*, **27**:5 (2017), 1549–1575.
- [4] Shramko Y., “Truth, falsehood, information and beyond: the American plan generalized”, *J. Michael Dunn on Information Based Logics*, Outstanding Contributions to Logic, ed. Bimbo, K., Springer, Dordrecht, 2016, 191–212.
- [5] Slaney J., “Solution to a problem of Ono and Komori”, *Journal of Philosophical Logic*, **18**:1 (1989), 103–111.

# Epistemic logics for ignorance representation

E. Kubyshkina<sup>1</sup>, M. Petrolo<sup>2</sup>

In our talk we will consider three epistemic logics for ignorance representation. The overall objective of the talk is to provide a comparative analysis of these three settings and evaluate the extent to which each logic succeeds in formalizing ignorance.

**Keywords:** Epistemic logic, ignorance that, ignorance whether, factive ignorance, frame definability.

Several current works in epistemic logic focus on finding a way to model the notion of ignorance (see, e.g., [4, 7, 3, 5]). One of the difficulties in achieving this task is that there is no agreement on exactly which notion one is trying to model. For instance, van der Hoek & Lomuscio [4] take ignorance to be “not knowing whether”, which is formally represented as an operator  $I$  definable via  $K$  in standard Kripke semantics as  $\neg K\varphi \wedge \neg K\neg\varphi$ , while Steinsvold [7] considers ignorance as “unknown truth”, formalized as  $\varphi \wedge \neg K\varphi$ . Indeed, even from an epistemological perspective, there exist at least two different definitions of ignorance. The Standard View takes ignorance as the “absence of knowledge”, while the so-called New View takes it as the “absence of true belief” (see [6]). Recently, Kubyshkina and Petrolo [5] introduced an alternative system for representing ignorance which is in line with the definition provided by the New View. The basic idea of the authors was to represent ignorance as a factive notion, i.e., if an agent is ignorant of  $\varphi$ , then  $\varphi$  is true, via a primitive modality  $I$  which is undefinable in terms of standard epistemic operator  $K$ . The main objective of our presentation is to provide a comparative analysis of the three approaches for ignorance representation.

The first definition we consider is the one of van der Hoek & Lomuscio [4], who provide a system for representing ignorance whether. Semantically, they use standard Kripke semantics, in which ignorance is represented via a primitive modality (we call it  $I^w$ ) as follows:

-  $M, w \models I^w\phi$  iff there exists  $w'$  such that  $Rww'$  and  $M, w' \not\models \phi$  and there exists  $w''$  such that  $Rww''$  and  $M, w'' \not\models \neg\phi$ .

The second definition belongs to Steinsvold [7, 8]. We call his operator  $Iu$ . It is defined on Kripke frames as follows:

-  $M, w \models I^u\phi$  iff  $M, w \models \phi$  and there exists  $w'$  such that  $Rww'$  and  $M, w' \models \varphi$ .

---

<sup>1</sup>*Ekaterina Kubyshkina* — Postdoctoral researcher, University of Campinas, Epistemology and History of Science, Centre for Logic, e-mail: ekubysh@unicamp.br

<sup>2</sup>*Mattia Petrolo* — Assistant professor, Federal University of ABC, Center for Natural and Human Sciences, e-mail: mattia.petrolo@ufabc.edu.br

The third option for ignorance representation is provided by Kubyshkina & Petrolo [5] and developed in Gilbert et al. [2]. We dub the ignorance operator  $I^f$  and it can be defined on Kripke frames as follows:

-  $M, w \models I^f \phi$  iff for all  $w'$  such that  $w'$  is not  $w$ ,  $M, w' \not\models \phi$  and  $M, w \models \phi$ .

All these three semantic frameworks characterize complete systems, the language of which is an extension of the language of classical propositional logic by the corresponding ignorance operator.

In our talk we will compare the three operators by considering their frame definability (see [1]) for the results on  $I^u$  operator). On this basis, we draw some conclusions on the expressivity of the languages containing ignorance operators, as well as on the specific conditions in which they can be used as primitive ones. This, in turn, will allow us to evaluate the extent to which each operator succeeds in formalizing its target concept.

## References

- [1] Gilbert, D., Venturi, G., “Reflexive insensitive modal logics.”, *The Review of Symbolic Logic*, **9** (2016), 167–180.
- [2] Gilbert, D., Kubyshkina, E., Petrolo, M., Venturi, G., “Logics of ignorance and being wrong.”, *Logic journal of the IGPL*, **Online First** (2021), 1–16.
- [3] Fan, J., van Ditmarsch, H., “Contingency and knowing whether.”, *The Review of Symbolic Logic*, **8(1)** (2015), 75–107.
- [4] Van der Hoek, W., Lomuscio, A., “A logic for ignorance.”, *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, **85(2)** (2004), 117–133.
- [5] Kubyshkina, E., Petrolo, M., “A logic for factive ignorance.”, *Synthese*, **198** (2021), 5917–5928.
- [6] Le Morvan, P., Peels, R., *The epistemic dimensions of ignorance*, Peels, R., Blaaw, M. (eds.), Cambridge University Press, 2016.
- [7] Steinsvold, C., “A note on logics of ignorance and borders.”, *Notre Dame Journal of Formal Logic*, **49(4)** (2008a), 385–392.
- [8] Steinsvold, C., “Completeness for various logics of essence and accident.”, *Bulletin of the Section of Logic*, **37(2)** (2008b), 93–101.

# Крипке+ДеГроот: эпистемико-доксатическая модель социального влияния

В. В. Долгоруков<sup>1</sup>

Предлагается эпистемико-доксатическая модель с социальным влиянием, позволяющая расширить классическую модель ДеГроота за счет более богатого описания мнения агентов.

**Ключевые слова:** модель ДеГроота, социальное влияние, эпистемическая логика

## 1. Введение

Американским статистиком Моррисом ДеГроотом [1] была предложена модель, описывающая динамику изменения мнений агентов, подверженных влиянию друг друга.

Модель ДеГроота состоит из двух компонентов: 1) описание мнения агентов и 2) описание влияния агентов друг на друга. Мнение агента в момент времени  $t$  представляет собой действительное число:  $x_i(t) \in [0, 1]$ . Влияние агентов друг на друга описывается стохастической матрицей  $T$ , в которой  $T_{ji} \in [0, 1]$  интуитивно соответствует пропорции, в которой  $i$ -агент учитывает мнение  $j$ -го агента.

Обновление мнений описывается как умножение матрицы  $T$  на вектор мнений  $x(t) = \langle x_1(t) \dots x_n(t) \rangle$  на предыдущем шаге:  $x(t+1) = T \cdot x(t)$ .

Мы бы хотели предложить модель, которая бы сохраняла описание влияния агентов друг на друга в виде стохастической матрицы, однако более подробным образом описывала бы мнения агентов. В качестве модели-носителя мнения агентов мы будем использоваться эпистемико-доксатическую модель Крипке.

## 2. Эпистемико-доксатическая модель Крипке

Будем называть эпистемико-доксатической моделью Крипке (см. [2]) следующую структуру  $M = (W, (\sim_i)_{i \in Ag}, (\preceq_i)_{i \in Ag}, V)$ , где  $W$  — непустое

---

<sup>1</sup>Долгоруков Виталий Владимирович — зам.заведующего, Международная лаборатория логики, лингвистики и формальной философии НИУ ВШЭ, e-mail: vdolgorukov@hse.ru

Dolgorukov Vitaliy Vladimirovich — deputy head, HSE University, International Laboratory for Logic, Linguistics and Formal Philosophy.

множество возможных миров;  $\sim_i$  — отношение эквивалентности на множестве  $W$  (интуитивно понимается как отношение неразличения миров агентом  $i \in Ag$ ;  $\preceq_i$  — рефлексивное и транзитивное отношение на множестве (интуитивно понимается как субъективное восприятие  $i$ -м агентом одного мира как не менее правдоподобного, чем другой);  $V$  — функция оценки, которая каждой пропозициональной переменной сопоставляет множество возможных миров. Предполагается, что отношения  $\preceq_i$  и  $\sim_i$  связаны следующим образом:  $\forall w' \forall w'' ((w' \preceq_i w'' \vee w'' \preceq_i w') \equiv w' \sim_i w'')$ .

Введем следующие обозначения:  $[\varphi]_M := \{w \in W \mid M, w \models \varphi\}$ ;  $[w]_i := \{w' \in W \mid w \sim_i w'\}$ ;  $max_{\preceq_i}(X) := \{w \in X \mid \forall w' \in X : w' \preceq_i w\}$ , где  $X \subseteq W$ .

Язык эпистемико-доксатической модели Крипке определяется следующей грамматикой  $\varphi, \psi ::= p \mid \neg\varphi \mid (\varphi \wedge \psi) \mid K_i\varphi \mid B_i\varphi$ , где  $p$  - пропозициональная переменная,  $i \in Ag$ . « $K_i\varphi$ » читается как «агент  $i$  знает, что  $\varphi$ », а « $B_i\varphi$ » читается как «агент  $i$  верит, что  $\varphi$ ». Опишем условия истинности формулы в отмеченной модели  $(M, w)$ .

- $M, w \models p$  е.т.е.  $w \in V(p)$
- $M, w \models \neg\varphi$  е.т.е.  $M, w \not\models \varphi$
- $M, w \models \varphi \wedge \psi$  е.т.е.  $M, w \models \varphi$  и  $M, w \models \psi$
- $M, w \models K_i\varphi$  е.т.е.  $\forall w' (w \sim_i w' \Rightarrow M, w' \models \varphi)$
- $M, w \models B_i\varphi$  е.т.е.  $\forall w' \in max_{\preceq_i}([w]_i) : M, w' \models \varphi$

### 3. Крипке+ДеГроот: эпистемико-доксатическая модель с социальным влиянием

Модель  $M = (W, (\sim_i)_{i \in Ag}, (\preceq_i)_{i \in Ag}, V, Infl, \theta)$  будем называть эпистемико-доксатической моделью с социальными влиянием. Данная модель добавляет к модели Крипке функцию социального влияния  $Infl : Ag \times Ag \mapsto [0, 1]$  и пороговое значение  $\theta \in [0, 1]$ . Функция социального влияния соответствует стохастической матрице в модели ДеГроота, то есть, предполагается, что  $\sum_{j \in Ag} Infl(j, i) = 1$ . Величина  $\theta$  определяет порог, при котором агент готов изменить свою точку зрения.

Введем оператор « $[I\varphi]\psi$ », который читается следующим образом: «после того как агенты обмениваются мнениями по поводу  $\varphi$  имеет место  $\psi$ ».

Таким образом, язык эпистемико-доксатической модели с социальными влиянием определяется следующей грамматикой:

$$\varphi, \psi ::= p \mid \neg\varphi \mid (\varphi \wedge \psi) \mid K_i\varphi \mid B_i\varphi \mid [I\varphi]\psi$$

Для того, чтобы описать семантику оператора  $[I\varphi]$  введем несколько обозначений и опишем механизм обновления модели.

Пусть  $Ag_a^{M,w}(\varphi) := \{i \in Ag \mid M, w \models B_a B_i \varphi\}$ , то есть, множество агентов, которые верят в  $\varphi$ , с точки зрения агента  $a$ , в отмеченной модели  $(M, w)$ . В обновленной модели  $M^{I\varphi}$  меняется только отношение  $\preceq_i$  по следующему принципу:

$$x \preceq_i^{I\varphi} y = \begin{cases} x \preceq_i^{\uparrow\varphi} y, & \text{если } \sum_{j \in Ag_a^{M,w}(\varphi)} Infl(j, i) \geq \theta \\ x \preceq_i y, & \text{иначе} \end{cases}$$

Здесь  $\preceq_i^{\uparrow\varphi}$  обозначает консервативное обновление отношения  $\preceq_i$ , то есть, минимальное отношение, которое удовлетворяет следующим условиям (см. [2]):

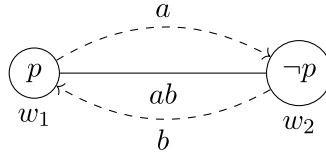
- $\forall x \forall y ((x \in best_i(\varphi, w) \wedge y \in [w]_i) \rightarrow y \prec_i^{\uparrow\varphi} x)$
- $\forall x \forall y ((x, y \in [w]_i - best_i(\varphi, w) \wedge x \preceq_i y) \rightarrow x \preceq_i^{\uparrow\varphi} y)$

Здесь  $best_i(\varphi, w) := \max_{\preceq_i}([w]_i \cap [\varphi]_M)$ .

Теперь мы можем дать определение оператору социального обновления:

$$M, w \models [I\varphi]\psi \text{ е.т.е. } M^{I\varphi}, w \models \psi$$

Рассмотрим простейший пример.



Пусть в модели  $M_1$  агенты  $a$  и  $b$  обладают противоположными мнениями по вопросу  $p$ , а функция социального влияния выглядит следующим образом:

$$\begin{pmatrix} 0, 2 & 0, 8 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Тогда, в отмеченной модели  $(M_1, w_1)$  верно, что  $B_a \neg p \wedge B_b p \wedge [Ip](B_b p \wedge B_a p)$ .

Можно рассмотреть более сложные случаи: агенты могут обладать истинным мнением, но заблуждаться относительно мнений друг друга:  $p \wedge B_a p \wedge B_b \neg p \wedge B_a B_b \neg p \wedge B_b B_a \neg p \wedge [Ip](B_a \neg p \wedge B_b \neg p)$ .

Отметим некоторые свойства данного оператора: (a)  $[I\varphi](\psi \rightarrow \chi) \rightarrow ([I\varphi]\psi \rightarrow [I\varphi]\chi)$ ; (b)  $\neg[I\varphi]\perp$ ; (c)  $\models \psi \Rightarrow \models [I\varphi]\psi$ ; (d)  $[I\varphi]p \equiv p$

Предполагается, что возможно сформулировать аксиомы редукции для логики с оператором  $\ll [I\varphi]\psi \gg$  за счет обогащения статического фрагмента конструкцией  $\ll Infl(G, a) \gg$  – суммарное влияние агентов из группы  $G$  на агента превышает пороговое значение.

## 4. Заключение

Предложенная эпистемико-доксатическая модель с социальным влиянием позволяет моделировать такие феномены информационные каскады, плюралистическое неведение, поляризация мнений и др.

Также возможно расширение модели за счет возможности динамического изменения функции влияния. В частности, агент  $a$  может перестать доверять мнению агента  $b$ , если  $a$  узнает, что  $b$  заблуждается относительно достоверной информации, которая есть у  $a$ .

## Список литературы

- [1] DeGroot Morris, “Reaching a Consensus”, *Journal of the American Statistical Association*, **69**:345 (1974), 118–121.
- [2] Pacuit Eric, “Dynamic Epistemic Logic II: Logics of Information Change”, *Philosophy Compass*, **8**:9 (2013), 815–833.

### **Kripke+DeGroot: An Epistemic-Doxastic Model for Social Influence** **Dolgorukov V.V.**

We propose an extension of DeGroot’s learning model with an epistemic-doxstic modal logic. It is argued that this framework can be applied for the analysis of informational cascades, pluralistic ignorance and other phenomenon.

*Keywords:* DeGroot, social influence, epistemic logic

## References

- [1] DeGroot Morris, “Reaching a Consensus”, *Journal of the American Statistical Association*, **69**:345 (1974), 118–121.
- [2] Pacuit Eric, “Dynamic Epistemic Logic II: Logics of Information Change”, *Philosophy Compass*, **8**:9 (2013), 815–833.



# Искусственный интеллект в финансах: за или против человека

Р. А. Кокорев<sup>1</sup>, О. Н. Лаврентьева<sup>2</sup>, И. Б. Суркова<sup>3</sup>,  
М. С. Толстель<sup>4</sup>, В. С. Трушина<sup>5</sup>

Прогресс в создании искусственного интеллекта (далее – ИИ) отражается как в эволюции его определений, так и в возрастании интереса к его использованию со стороны участников финансового рынка по всему миру и регуляторов. С точки зрения пользователей финансовых услуг можно выделить определенные возможности и вызовы, сопровождающие внедрение ИИ в этой сфере. Несмотря на предупреждения о подобных рисках, звучащие в том числе от представителей бизнес-сообщества, крупные компании продвигают в качестве «лучших практик» при использовании данных весьма спорные с точки зрения потребителя рекомендации. Приобретает особую важность «человеческий» фактор и более тщательное изучение не рационализируемых напрямую особенностей поведения и

---

<sup>1</sup>*Кокорев Ростислав Александрович* — заведующий лабораторией финансовой грамотности Экономического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, e-mail: rkokorev@yandex.ru.

Kokorev Rostislav Aleksandrovich — Head of Financial Literacy Laboratory, Faculty of Economics, Lomonosov MSU.

<sup>2</sup>*Лаврентьева Ольга Николаевна* — инженер лаборатории информационно-аналитических ресурсов Кафедры макроэкономической политики и стратегического управления Экономического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, e-mail: onlavrentieva@gmail.com.

Lavrentieva Olga Nikolaevna — Engineer of Information and Analytical Resources Laboratory, Department of Macroeconomic Policy and Strategic Management, Faculty of Economics, Lomonosov MSU.

<sup>3</sup>*Суркова Ирина Борисовна* — инженер лаборатории информационно-аналитических ресурсов Кафедры макроэкономической политики и стратегического управления Экономического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, e-mail: wanderes28@gmail.com.

Surkova Irina Borisovna — Engineer of Information and Analytical Resources Laboratory, Department of Macroeconomic Policy and Strategic Management, Faculty of Economics, Lomonosov MSU.

<sup>4</sup>*Толстель Марина Сергеевна* — доцент кафедры Финансы и кредит Экономического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, e-mail: marina-tolstel@yandex.ru.

Tolstel Marina Sergeevna — Associate Professor, Department of Finance and Credit, Faculty of Economics, Lomonosov MSU.

<sup>5</sup>*Трушина Валентина Сергеевна* — инженер лаборатории информационно-аналитических ресурсов Кафедры макроэкономической политики и стратегического управления Экономического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, e-mail: v.trushina@gmail.com.

Trushina Valentina Sergeevna — Engineer of Information and Analytical Resources Laboratory, Department of Macroeconomic Policy and Strategic Management, Faculty of Economics, Lomonosov MSU.

принятия решений людьми, в том числе в сфере потребительских услуг финансового рынка, для которых ИИ становится все более распространенной технологией.

**Ключевые слова:** искусственный интеллект, финансовые услуги для потребителей, принятие решений.

Прогресс в создании искусственного интеллекта (далее – ИИ) отражается как в эволюции его определений, так и в возрастании интереса к его использованию со стороны участников финансового рынка по всему миру и регуляторов ([2],[10]). Примером разнообразия подходов является выделение таких видов ИИ интеллекта как а) символический ИИ, основанный на переводе человеческих знаний и логических утверждений в явно запрограммированные правила; б) статистический ИИ, относящийся к разработке систем, логика функционирования которых диктуется не закодированными человеческими знаниями на основе правил, а возникает в результате анализа первичных данных; в) общий ИИ, описывающий пока не существующие системы, обладающие универсальными способностями наравне с человеческим разумом; г) узкий ИИ, включающий системы, возможности которых ограничены относительно узкими, заранее определенными задачами, для которых они были разработаны; именно такие системы в настоящее время наиболее активно используются и внедряются бизнесом и государством ([8]).

Исторически использование термина ИИ объяснялось развитием технологий в направлении имитации естественного интеллекта (далее – ЕИ). На сегодня имеется существенный разрыв между возможностями ИИ и ЕИ. По ряду направлений отмечается превосходство ИИ над ЕИ (например, при воссоздании сложных систем методом цифровых двойников [5] или анализе взаимосвязей в большом массиве собранных данных). Тем не менее, на настоящий момент ни одна разработка ИИ не превзошла ЕИ в следующих существенных направлениях: i) нахождение причинно-следственных связей, ii) обоснование принимаемых решений, iii) постановка целей, iv) создание нового ([8]).

Если говорить о тех областях финансового рынка, где ИИ уже активно внедряется, в том числе и в России ([7],[9],[11]), то с точки зрения пользователей финансовых услуг можно выделить определенные возможности и вызовы. Среди возможностей – увеличение финансовой доступности ряда финансовых услуг за счет снижения транзакционных издержек их предоставления продавцами, а также расширение прав и возможностей потребителей за счет того, что продавцы расширяют объем предлагаемых услуг пользователям, о которых у продавцов появляется больший объем информации. Среди рисков – 1) необоснованный отказ в обслуживании в контексте предотвращения финансовых преступлений; 2) незаконная дискриминация и несправедливое дифференцированное

обращение с разными клиентами; 3) несоответствие между доступными клиентам продуктами, которые были предложены им ИИ, и реальными потребностями клиентов; 4) «оцифровывание» все большего числа сторон жизни и сокращение пространства «частной» жизни (что характерно в принципе для всех сторон жизни человека, которые затрагивает цифровизация). Эти риски можно проследить на таких явлениях как роботизация контакт-центров, применение робо-эдвайзеров в управлении частным капиталом, кредитном скоринге, роботизированное предотвращение мошенничества в банковской сфере, динамическое ценообразование и биометрическую идентификацию пользователей.

Характерно, что несмотря на предупреждения о подобных рисках, звучащие в том числе от представителей бизнес-сообщества ([4],[6]), крупные компании продвигают в качестве «лучших практик» при использовании данных весьма спорные с точки зрения потребителя рекомендации (например, об использовании сотовых операторов в качестве провайдеров аналитических услуг для банков при выдаче кредитов [1]).

Все вышеперечисленные соображения приводят к важности «человеческого» фактора в вопросах, связанных с применением ИИ в различных сферах (яркий пример рисков неэффективного применения ИИ и возможностей человека «взломать» систему в области найма на работу приведен в [3]). Понимание того, что за каждым роботом всегда стоят люди, которые определяют принципы (в том числе этический выбор) и/или данные, на которых работают алгоритмы, придает особенную важность более тщательного изучения не рационализируемых напрямую особенностей поведения и принятия решений людьми, особенно в сфере потребительских услуг финансового рынка, для которых ИИ становится все более распространенной технологией.

## Список литературы

- [1] Ассоциация больших данных, “Белая книга. Свод лучших практик в сфере добровольного использования данных”, 2021, <https://rubda.ru/deyatelnost/kodeks/>.
- [2] Банк России, “Обзор регулирования финансовых рынков № 5 18.11.2016 – 31.01.2017”, 2017.
- [3] Демьяненко В., “Неестественный отбор: как алгоритмы «скрывают» работников”, 2021, <https://econs.online/articles/ekonomika/neestestvennyu-otbor-kak-algoritmy-skryvayut-rabotnikov/>.
- [4] Касперская Н., “Интервью радио «Business FM» от 22 октября 2021. Наталья Касперская: лучше иметь код на телефоне, чем Face ID.”, 2021, <https://www.bfm.ru/news/484167>.
- [5] “Управление строительным комплексом на основе технологии информационного моделирования зданий”, *Заседание научного семинара по исследованиям цифровой экономики экономиче-*

- ского факультета МГУ М.В.Ломоносова от 06.10.2021, 2021, <https://www.youtube.com/watch?v=NpKH4VES3AA>.
- [6] Нехаенко А., “По лицу в метро? Лучше не надо”, *Портал «Банки.ру»*, 2021, <https://www.banki.ru/news/daytheme/?id=10955448>.
- [7] Эскиндаров М.А., Соловьев В.И. (ред.), “Парадигмы цифровой экономики: Технологии искусственного интеллекта в финансах и финтехе”, 2019.
- [8] Buckmann Marcus, Haldane Andy and Anne Caroline Hüser, “Comparing minds and machines: implications for financial stability. Staff Working Paper No. 937”, *Bank of England*, 2021.
- [9] “AI-bank of the future: Can banks meet the AI challenge?”, *McKinsey & Company*, 2020.
- [10] “Artificial Intelligence, Machine Learning and Big Data in Finance: Opportunities, Challenges, and Implications for Policy Makers”, *OECD*, 2021.
- [11] Ostmann, F., and Dorobantu C., “AI in financial services”, *The Alan Turing Institute*, 2021.

**Artificial intelligence in finance: for or against human**  
**Kokorev R.A., Lavrentieva O.N., Surkova I.B., Tolstel M.S.,**  
**Trushina V.S**

Progress in the creation of artificial intelligence (hereinafter - AI) is reflected both in the evolution of its definitions and in the increasing interest in its use by financial market participants around the world and regulators. From the perspective of users of financial services, one can identify certain opportunities and challenges accompanying the introduction of AI in this sphere. Despite warnings about such risks, including from representatives of the business community, large companies promote as "best practices" in the use of data recommendations that are very controversial from the point of view of the consumer. The "human" factor is of particular importance, as is a more thorough study of human behavior and decision-making that cannot be directly rationalized, including in financial consumer services, for which AI is becoming an increasingly widespread technology.

*Keywords:* artificial intelligence, consumer financial services, decision making.

## References

- [1] Big Data Association, “White Paper. A compendium of best practices in the voluntary use of data”, 2021 (In Russian), <https://rubda.ru/deyatelnost/kodeks/>.
- [2] Bank of Russia, “Review of Financial Market Regulation No. 5 18.11.2016 – 31.01.2017”, 2017 (In Russian).
- [3] Demyanenko V., “Unnatural selection: how algorithms "hide" employees”, 2021 (In Russian), <https://econs.online/articles/ekonomika/neestestvennyy-otbor-kak-algoritmy-skryvayut-rabotnikov/>.

- [4] Kasperskaya N., “Interview with "Business FM"radio on October 22, 2021. Natalya Kasperskaya: Better to have a code on your phone than Face ID”, 2021 (In Russian), <https://www.bfm.ru/news/484167>.
- [5] “Management of the Construction Complex on the Basis of Building Information Modeling Technology”, *Session of the Scientific Seminar on Digital Economy Research, Faculty of Economics, Moscow State University, M.V. Lomonosov, 06.10.2021*, 2021 (In Russian), <https://www.youtube.com/watch?v=NpkH4VES3AA>.
- [6] Nehaenko A., “In the face in the subway? Better not”, *Banki.ru portal*, 2021 (In Russian), <https://www.banki.ru/news/daytheme/?id=10955448>.
- [7] Eskindarov M.A., Solovyov V.I. (eds.), “Paradigms of Digital Economy: Artificial Intelligence Technologies in Finance and Fintech”, 2019 (In Russian).
- [8] Buckmann Marcus, Haldane Andy and Anne Caroline Hüser, “Comparing minds and machines: implications for financial stability. Staff Working Paper No. 937”, *Bank of England*, 2021.
- [9] “AI-bank of the future: Can banks meet the AI challenge?”, *McKinsey & Company*, 2020.
- [10] “Artificial Intelligence, Machine Learning and Big Data in Finance: Opportunities, Challenges, and Implications for Policy Makers”, *OECD*, 2021.
- [11] Ostmann, F., and Dorobantu C., “AI in financial services”, *The Alan Turing Institute*, 2021.

# Логика суждений существования как средство представления знаний и автоматической проверки умозаключений

В. И. Маркин<sup>1</sup>

Строится формальная система, предназначенная для логического анализа суждений существования. В ее языке содержится неопределенно-местная константа существования, простые формулы образуются сочленением этой константы с произвольной конечной последовательностью общих терминов. Предлагается аналитико-табличный вариант этой логики, формулируется разрешающая процедура.

Исследование выполнено в рамках научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова «Мозг, когнитивные системы и искусственный интеллект».

**Ключевые слова:** суждения существования, исчисление, семантика, аналитические таблицы, разрешающая процедура

В традиционной логике суждением существования называлось простое суждение, логическим сказуемым которого является термин «существует», рассматриваемый не как квантор, а как предикат особого типа, как знак особой онтологической характеристики индивидов. Субъектами суждений существования могут быть как сингулярные<sup>2</sup>, так и общие термины. Последние могут быть простыми (положительными) и отрицательными (образовываться из простых с помощью терминного отрицания). В качестве субъекта может также выступать последовательность, которая получается посредством сочленения нескольких общих терминов.

Стандартные атрибутивные суждения могут быть определены (различным образом для разных силлогистических теорий) посредством суждений существования или их булевых комбинаций. Например, суждения фундаментальной силлогистики могут быть определены следующим образом: «Все  $S$  есть  $P$ » посредством суждения « $S$  не- $P$  не существуют», «Некоторые  $S$  есть  $P$ » — суждения « $S P$  существуют», «Ни один  $S$  не есть  $P$ » — суждения « $S P$  не существуют», «Некоторые  $S$  не есть  $P$ » —

---

<sup>1</sup> *Маркин Владимир Ильич* — заведующий кафедрой логики философского факультета МГУ, e-mail: vladimirmarkin@mail.ru.

Markin Vladimir Ilich — head of Chair of Logic, Faculty of Philosophy, Lomonosov Moscow State University

<sup>2</sup>В данной работе мы не рассматриваем суждения существования с сингулярными субъектами.

суждения « $S$  не- $P$  существуют» (см. [1]). К суждениям существования (или сложным суждениям, образованным из них) могут быть редуцированы атрибутивные суждения не только с простыми, но и со сложными субъектами и предикатами. Например, суждение «Все  $S$  и  $P$  есть  $Q$  или не- $R$ » эквивалентно суждению « $S P$  не- $Q R$  не существуют».

В [2] был сформулирован язык, позволяющий фиксировать логические формы суждений существования, и предложена естественная его семантика.

В алфавите данного языка содержатся: бесконечный список простых общих терминов (будем использовать для них метAPERеменные  $S, P, M, S_1, \dots$ ), символ терминного отрицания ( $'$ ), неопределенно-местная константа существования ( $\Upsilon$ ), пропозициональные связки и скобки. *Общими терминами* являются: (1) произвольный простой общий термин, (2) выражение вида  $S'$ , где  $S$  — простой общий термин. При этом  $S$  называется *положительным*, а  $S'$  *отрицательным* термином. В качестве метAPERеменных по любым общим терминам (как положительным, так и отрицательным) используются символы  $X, Z, X_1, \dots$ .

*Атомарными формулами* языка являются выражения вида  $\Upsilon X_1 X_2 \dots X_k$  ( $k \geq 1$ ), где  $X_1, X_2, \dots, X_k$  — общие термины. Формула  $\Upsilon X_1 X_2 \dots X_k$  фиксирует логическую форму суждения существования « $X_1 X_2 \dots X_k$  существуют». *Сложные формулы* образуются из других формул с помощью пропозициональных связок.

*Моделью* называется пара  $\langle \mathbf{D}, \varphi \rangle$ , где  $\mathbf{D} \neq \emptyset$ , а  $\varphi(S) \subseteq \mathbf{D}$  для любого простого общего термина  $S$ . Определяется функция  $\psi$ , сопоставляющая значение каждому общему термину (включая отрицательные) в модели  $\langle \mathbf{D}, \varphi \rangle$ :  $\psi(S) = \varphi(S)$ ,  $\psi(S') = \mathbf{D} \setminus \varphi(S)$ . Вводится понятие  *$\mathbf{V}$ -значимости* формулы в модели  $\langle \mathbf{D}, \varphi \rangle$ . Условия значимости атомарных формул определяются следующим образом:

$$\mathbf{V}(\Upsilon X_1 X_2 \dots X_k, \mathbf{D}, \varphi), \text{ е.т.е. } \psi(X_1) \cap \psi(X_2) \cap \dots \cap \psi(X_k) \neq \emptyset.$$

Условия значимости формул, образованных с помощью пропозициональных связок, стандартные. Формула  $A$  называется  *$\mathbf{V}$ -общезначимой*, е.т.е.  $\mathbf{V}(A, \mathbf{D}, \varphi)$  в каждой модели  $\langle \mathbf{D}, \varphi \rangle$ .

В [2] было построено аксиоматическое исчисление  $\mathbf{C}\Upsilon$ , формализующее класс  $\mathbf{V}$ -общезначимых формул. Доказана метатеорема о том, что  $\mathbf{C}\Upsilon$  погружается в классическое одноместное исчисление предикатов посредством следующего перевода  $\otimes$ :

$$\begin{aligned} (\Upsilon u)^\otimes &= \exists x (S_1 x \wedge S_2 x \wedge \dots \wedge S_n x \wedge \neg P_1 x \wedge \neg P_2 x \wedge \dots \wedge \neg P_n x), \\ (\neg A)^\otimes &= \neg A^\otimes, \quad (A \nabla B)^\otimes = A^\otimes \nabla B^\otimes, \end{aligned}$$

где  $u$  — произвольная конечная последовательность общих терминов,  $S_1 S_2 \dots S_n$  — результат вычеркивания из  $u$  всех отрицательных терминов.

нов,  $P'_1 P'_2 \dots P'_m$  — результат вычеркивания из  $u$  всех положительных терминов,  $\nabla$  — произвольная бинарная пропозициональная связка.

Язык логики суждений существования представляет собой простой и удобный инструмент для фиксации информации о существовании или несуществовании объектов, обладающих или не обладающих свойствами из некоторого списка, причем эта информация может быть выражена в том числе и атрибутивными суждениями с субъектами и предикатами произвольной сложности. Исчисление **СУ**, сравнимое по своим дедуктивным возможностям с одноместным исчислением предикатов, обеспечивает необходимый аппарат для извлечения следствий из имеющейся информации указанного типа. Можно сформулировать аналитико-табличный вариант **СУ**, с использованием которого процедура проверки умозаключений из суждений существования может быть автоматизирована.

*Конфигурацией* называется семейство непустых множеств формул языка.

*Аналитической таблицей* называется последовательность конфигураций, в которой каждая последующая конфигурация получается из непосредственно предыдущей заменой некоторого множества формул по одному из правил вывода.

В качестве правил вывода постулируются стандартные правила редукции для формул видов  $(A \wedge B)$ ,  $\neg(A \wedge B)$ ,  $(A \vee B)$ ,  $\neg(A \vee B)$ ,  $(A \supset B)$ ,  $\neg(A \supset B)$ ,  $\neg\neg A$ , а также дополнительные правила:

$$\begin{array}{l}
 \langle \Upsilon \mathbf{i} \rangle \quad \frac{\Gamma}{\Gamma \cup \{\Upsilon M\} \mid \Gamma \cup \{\Upsilon M'\}} \\
 \langle \Upsilon \rangle \quad \frac{\Gamma \cup \{\Upsilon u\}}{\Gamma \cup \{\Upsilon u M\} \mid \Gamma \cup \{\Upsilon u M'\}} \\
 \langle \Upsilon \mathbf{n} \rangle \quad \frac{\Gamma \cup \{\Upsilon u\}}{\Gamma \cup \{\Upsilon [u]\}} \\
 \langle \neg \Upsilon \mathbf{i} \rangle \quad \frac{\Gamma}{\Gamma \cup \{\neg \Upsilon M M'\}} \\
 \langle \neg \Upsilon \rangle \quad \frac{\Gamma \cup \{\neg \Upsilon u\}}{\Gamma \cup \{\neg \Upsilon u M, \neg \Upsilon u M'\}} \\
 \langle \neg \Upsilon \mathbf{n} \rangle \quad \frac{\Gamma \cup \{\neg \Upsilon u\}}{\Gamma \cup \{\neg \Upsilon [u]\}}
 \end{array}$$

где  $u$  — произвольная последовательность общих терминов,  $[u]$  — последовательность, содержащая без повторов все термины из  $u$ , причем (1) каждый положительный термин в ней предшествует каждому отрицательному, (2) положительный термин  $S$  предшествует в ней положительному термину  $P$ , е.т.е.  $S$  предшествует  $P$  в алфавите языка, (3) отрицательный термин  $S'$  предшествует в ней отрицательному термину  $P'$ , е.т.е.  $S$  предшествует  $P$  в алфавите языка.

Множество формул *замкнуто*, е.т.е. оно содержит формулы вида  $C$  и  $\neg C$ .

Конфигурация *замкнута*, е.т.е. все множества формул в ее составе замкнуты.



Аналитическая таблица *замкнута*, е.т.е. ее последняя конфигурация замкнута.

Формула  $A$  *доказуема*, е.т.е. существует замкнутая аналитическая таблица, первой конфигурацией которой является семейство  $\{\{\neg A\}\}$ . Из формул  $A_1, A_2, \dots, A_n$  *выводима* формула  $B$ , е.т.е. существует замкнутая аналитическая таблица, первой конфигурацией которой является семейство  $\{\{A_1, A_2, \dots, A_n, \neg B\}\}$ .

Сформулируем *разрешающую процедуру*, позволяющую в конечное число шагов решать вопрос о доказуемости формулы  $A$  или выводимости формулы  $B$  из  $A_1, A_2, \dots, A_n$ .

1. Выделяется список  $\mathbf{T}$  положительных терминов, содержащий все такие  $P$ , что  $P$  или  $P'$  входят в состав по крайней мере одной формулы из единственного множества в первой конфигурации.

2. Применяются правила  $\langle \wedge \rangle$ ,  $\langle \neg \wedge \rangle$ ,  $\langle \vee \rangle$ ,  $\langle \neg \vee \rangle$ ,  $\langle \supset \rangle$ ,  $\langle \neg \supset \rangle$ ,  $\langle \neg \neg \rangle$  до тех пор, пока в каждом множестве в составе конфигураций не останутся лишь формулы видов  $\Upsilon u$  и  $\neg \Upsilon u$ .

3. Применяются правила  $\langle \Upsilon \mathbf{i} \rangle$  и  $\langle \neg \Upsilon \mathbf{i} \rangle$  относительно любого положительного термина  $M$  из списка  $\mathbf{T}$ .

4. Применяются правила  $\langle \Upsilon \rangle$  и  $\langle \neg \Upsilon \rangle$  относительно любой формулы вида  $\Upsilon u$  и  $\neg \Upsilon u$  и любого положительного термина  $M$  из списка  $\mathbf{T}$  такого, что ни  $M$ , ни  $M'$  не входят в  $u$ .

5. Применяются правила  $\langle \Upsilon \mathbf{n} \rangle$  и  $\langle \neg \Upsilon \mathbf{n} \rangle$  относительно всех формул вида  $\Upsilon u$  и  $\neg \Upsilon u$  таких, что  $u$  в них не совпадает с  $[u]$ .

В итоге каждая формула в любом множестве последней конфигурации будет иметь вид  $\Upsilon[u]$  или  $\neg \Upsilon[u]$ , причем для любого термина  $M$  из списка  $\mathbf{T}$  верно, что  $M$  или  $M'$  входят в  $[u]$ . Данная процедура конечна, после ее завершения в последней конфигурации окажется конечное число множеств формул. Эти множества проверяются на замкнутость и применяется критерий из определений доказуемой формулы и отношения выводимости.

## Список литературы

- [1] Brandl J. L., “Brentano’s Theory of Judgement”, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, <https://plato.stanford.edu/entries/brentanojudgement/>.
- [2] Markin V. I., “Logic of existence judgements and syllogistic”, *Logical Investigations*, **27**:2 (2021), 31–47.

# Logic of existence judgements as an instrument of knowledge representation and automatic inference verification

## Markin V.I.

We set out a formal system for logical analyses of existence judgements. Its language contains the constant of existence, atomic formulas are formed by the concatenation of this constant with any finite sequence of general terms. We formulate an analytic tableaux version of this logic and a decision procedure for it.

This research has been supported by the Interdisciplinary Scientific and Educational School of Moscow University “Brain, Cognitive Systems, Artificial Intelligence”.

**Keywords:** existence judgements, logical calculus, semantics, analytic tableaux, decision procedure

## References

- [1] Brandl J. L., “Brentano’s Theory of Judgement”, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, <https://plato.stanford.edu/entries/brentanojudgement/>.
- [2] Markin V. I., “Logic of existence judgements and syllogistic”, *Logical Investigations*, **27:2** (2021), 31–47.

# Искусственный интеллект как инструмент построения персональных инвестиционных маршрутов для технологических проектов

А. А. Морозов<sup>1</sup>, Е. Б. Тищенко<sup>2</sup>

Применение методов искусственного интеллекта и методов машинного обучения для выполнения задач маршрутизации с последующим прогностическим моделированием оптимальной стратегии действий становится эффективным инструментом в прикладном применении к развитию инновационной экономики. Системы поддержки принятия решений, предлагающие возможные пути развития бизнеса и предлагающие решения на основе размеченных Data Setов, становятся драйверами как для стартапов, так и для крупных корпораций, работающих в сфере развития новых технологий.

**Ключевые слова:** искусственный интеллект, персональных инвестиционных маршрутов для технологических проектов, принятие решений

На текущий момент маршрутизаторами по инновационной инфраструктуре в РФ являются акселераторы и нанятые ими специалисты — трекеры и коучи, выстраивающие персональный путь для развития бизнеса и привлечения финансирования с помощью различных инвестиционных инструментов. Они решают проблему преодоления “недофинансирования” технологических проектов и помогают стартапам построить дорогу среди сервисов инновационной экосистемы для оптимизации затрат на проект при его реализации. Однако, как и любой персонализированный человеко-центричный сервис, такие маршруты субъективны и не дают качественного результата для решения проблем стартапов и технологических компаний. Альтернативой для решения данной задачи является применение ИИ с системой предиктивного анализа оптимального инвестиционного маршрута, который в процессе выполнения сервиса обращается к постоянно обновляемой базы знаний об инструментах

---

<sup>1</sup> Морозов Александр Андреевич — генеральный директор, управляющий партнер ООО “Тайм 2 Мейк Техно”, e-mail: a.morozov@t2mt.io.

Morozov Alexandr Andreevich — director, managing partner of Time 2 Make Techno Ltd

<sup>2</sup> Тищенко Елена Борисовна — доцент кафедры экономики инноваций экономического факультета МГУ, e-mail: elenasemenova@bk.ru.

Tishchenko Elena Borisovna — associate professor, Department of Innovation Economics, Faculty of Economics, Lomonosov Moscow State University

инновационной инфраструктуры и сопоставляет технологический проект с инструментами финансирования по 50 атрибутам, строя сложную прогностическую модель[1].

Целью данного научного исследования является разработка алгоритма (способа) машинного обучения и ИИ на основе сверточной нейросети, позволяющей автоматизировать задачу навигации технологических проектов по инструментам инвестиционного финансирования и задачу для построения непрерывного инвестиционного маршрута. Алгоритм лег в основу технологической платформы Time 2 Make Techno, предсказывающей и выстраивающей инвестиционные маршруты для пользователей (технологических проектов). Сейчас нейросеть платформы в закрытом режиме проходит итерационное обучение.

Персональный инвестиционный маршрут (ПИМ) — это множество (от 4 до 6) финансовых инвестиционных инструментов поддержки технологического проекта, подобранных по уровню соответствия текущему уровню развития технологического проекта и ранжированных по ряду актуальных в момент запроса параметров. Благодаря подобранному маршруту проект может набрать необходимую сумму финансирования из различных источников в кратчайшие сроки, комбинируя инструменты для развития бизнеса.

Критериями оптимального ПИМ для технологической компании были выведены в процессе эмпирического опыта команды автора данной статьи, имеющего опыт работы в качестве Технологического брокера на российском рынке более 5 лет.

Результатом исследования является методика построения персонального инвестиционного маршрута. Построение алгоритма базируется на основе сопоставления ряда параметров юридического лица, параметров развития бизнеса и параметров развития проекта с рядом аналогичных параметров, определенных множеством программ финансирования, предъявляемым к соответствующим стадиям развития проекта.

Алгоритм сопоставления параметров проекта и параметров программы финансирования строится по следующей последовательности:

- 1) Определение цели привлечения финансирования для технологического проекта ( $M$ ) на основе направления предполагаемых затрат. Выделение множества программ финансирования, соответствующих цели, на основе размеченной по сегментам целей базы программ финансирования.
- 2) Добавление к полученному на пересечении стадии и цели подмножеству программ подмножеств предыдущей стадии и следующей стадии.

- 3) Добавление к полученному в пункте 3 множеству: всех частных источников финансирования по типу денег из стадий  $N$ ,  $N + 1$ ,  $N - 1$ .
- 4) Добавление к полученному в пункте 4 множеству: всех налоговых и сервисных льгот по типу денег из стадий  $N$ ,  $N - 1$ .

Для автоматизация формирования оптимального ПИМ, соответствующего критериям, указанным выше в настоящее время не разработаны и четко не определены функции с заданными параметрами. В этой связи в исследовании было предложено обучить целевую функцию сформированным дата сетом из 250 компаний и 500 программ финансирования и выявить соотношение входных и выходных переменных для прогнозирования целевых функций.

Задача применения ИИ для построения ПИМ разделяется на три математические подзадачи, где функции нелинейны и требуют обучения в нейросетях:

- прогнозирование вероятности привлечения технологическим проектом ресурсов из конкретного инвестиционного инструмента;
- прогностическое моделирование будущего роста компании на основе данных о похожих на рынке технологических проектах и регрессивных данных о текущем развитии бизнеса, юридического лица и проекта;
- прогностическое моделирование набора целей технологического проекта для параметров приоритизации базовых и уточняющих атрибутов инвестиционного инструмента для последующего ранжирования в построении ПИМ

Для целей запуска машинного обучения используются рекуррентные нейронные сети LSTM и CW-RNN [2]. Для целей набора данных и запуска обучения системы используется базовая версия платформы Time 2 Make Techno, имеющая систему сбора заявок и личный кабинет, необходимый для сбора всех ключевых атрибутов технологических проектов, представленный по электронному адресу <https://anketa.t2mt.io/> Для целей набора и разметки данных используются данные о проектах-выпускники акселератора Архипелаг 2121 на основе их согласия. Разметка данных и составление ПИМ происходит вручную группой технологических брокеров.

Благодаря такому подходу к обучению системы в существующем проекте Time 2 Make Techno, специализирующемся на составлении ПИМ для

технологических проектов, достигается возможность повышения скорости подбора соответствующего источника финансирования текущей стадии проекта с учетом как отраслевой принадлежности проекта, так и уровня стадии его развития [3].

## Список литературы

- [1] Бульгина О. В., Емельянов А. А., Росс Г. В., Яшин Е. С., “Инвестиции, инновации, импортозамещение: имитационное моделирование с элементами искусственного интеллекта в управлении проектными рисками”, *Прикладная Информатика*, 2020, № 1(85), 68–102.
- [2] Китова О. В., Колмаков И. Б., Пеньков И. А., “Метод машин опорных векторов для прогнозирования показателей инвестиций”, *Экономика. Статистика. Информатика*, 2016, № 4, <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-mashin-opornyh-vektorov-dlya-prognozirovaniya-pokazateley-investitsiy/viewer>.
- [3] Курманова Л. Р., Курбанаева Л. Х., Хадыев Т. И., “Применение искусственного интеллекта в скоринговых системах российских банков”, *Инновационная политика. Управление инновациями*, 2019, № 6(54), 41, [http://www.ineconomic.ru/sites/field\\_print\\_version/jurnal-6-54-2019.pdf#page=41](http://www.ineconomic.ru/sites/field_print_version/jurnal-6-54-2019.pdf#page=41).

### Artificial intelligence as a tool for building personal investment routes for technological projects Morozov A.A., Tishchenko E.B.

The use of artificial intelligence methods and machine learning methods to perform routing tasks, followed by predictive modeling of the optimal action strategy, becomes an effective tool in applied application to the development of an innovative economy. Decision support systems offering possible ways of business development and offering solutions based on marked-up Data Sets are becoming drivers for both startups and large corporations working in the development of new technologies.

**Keywords:** artificial intelligence, personal investment routes for technology projects, decision-making

## References

- [1] Bulygina O. V., Emelianov A. A., Ross G. V., Yashin E. S., “Investments, innovations, import substitution: simulation modeling with elements of artificial intelligence in project risk management”, *Applied Informatics*, 2020, № 1(85), 68–102 (In Russian).

- [2] Kitova O. V., Kolmakov I. B., Penkov I. A., “Support Vector Machine Method for Predicting Investment Performance”, *Economy. Statistics. Informatics*, 2016, №4 (In Russian), <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-mashin-opornyh-vektorov-dlya-prognozirovaniya-pokazateley-investitsiy/viewer>.
- [3] Kurmanova L. R., Kurbaeva L. Kh., Khadyev T. I., “Application of artificial intelligence in scoring systems of Russian banks”, *Innovation policy. Innovation management*, 2019, №6(54), 41 (In Russian), [http://www.ineconomic.ru/sites/field\\_print\\_version/jurnal-6-54-2019.pdf#page=41](http://www.ineconomic.ru/sites/field_print_version/jurnal-6-54-2019.pdf#page=41).

# Экономический анализ поведения участников цифровых экосистем

А. А. Моросанова<sup>1</sup>

Современные цифровые технологии, в частности, искусственный интеллект, являются основой для существования цифровых экосистем, которые функционируют в разнообразных сферах, а следовательно, и рынках. Представленное исследование касается анализа поведения участников экосистем, которое подкрепляется математическим моделированием. Полученные выводы из анализа при различных структурах рынка свидетельствуют о множественных эффектах, не только прямых и косвенных сетевых, но и «петлях обратной связи», которые нужно принимать во внимание при принятии бизнес и управленческих решений.

**Ключевые слова:** цифровые экосистемы, конкурентная политика, монополии, платформы, искусственный интеллект

## 1. Введение

Цифровые технологии, технологии искусственного интеллекта (ИИ), анализ больших данных сейчас являются главными элементами для создания стоимости. Структура и направления деятельности экосистемы, главным образом, зависят от профиля родительской компании, которая является, как правило цифровой, и применяет технологии ИИ. В частности, экосистемы чаще всего имеют в своем «арсенале» рынки на основе ИИ: голосовые ассистенты, биометрию, использование беспилотного транспорта и доставки. Российские экосистемы Яндекс, Сбербанк и Mail.ru Group развиваются по многим представленным направлениям, разрабатывая или захватывая новые технологии. На рынках, связанных с ИИ, где ведутся прорывные разработки, действуют, преимущественно экосистемы или цифровые платформы, которые благодаря сетевой структуре могут гибко и оперативно искать пути решения для развития. Вопрос, поднимаемый в представленном исследовании связан с тем, как действия экосистемы могут повлиять на структуру соответствующего рынка, а следовательно на общее экономическое благосостояние, благосостояние, потребителей.

---

<sup>1</sup> Моросанова Анастасия Андреевна — н.с. МГУ имени М.В. Ломоносова, н.с. Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ, e-mail: nastya.komkova@gmail.com.

Morosanova Anastasia Andreevna — researcher, Lomonosov Moscow State University, The Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration



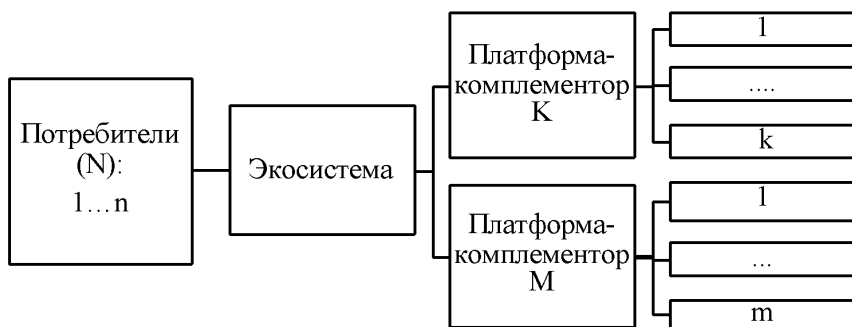


Рис. 1. Структура экосистемы. Источник: составлено автором

В представляемом исследовании показана разработанная экономико-математическая модель конкуренции экосистем, которая позволяет проанализировать возможности по недобросовестному поведению таких экосистем. За основу модели взята модель М. Армстронга[1], которая описывает поведение платформ на двусторонних рынках, где проанализированы различные структуры рынка: при монопольном положении, ситуация, когда каждый из участников может присоединиться только к одной экосистеме (two-sided single-homing) или же когда участники могут присоединяться сразу к нескольким платформам (two-sided multi-homing). Главное отличие предложенной модели заключается в возможности исследования различных эффектов, свойственных для экосистем, не только перекрестных сетевых эффектов, но и эффекта портфолио и эффекта обратной связи (петли обратной связи).

Цифровая экосистема предполагает наличие двух комплементоров, которые являются платформами. Они создают каждый свой продукт, которые лучше потреблять в совокупности (см. Рисунок 1). Также качество товаров (услуг), которые производит комплементор, зависят от качества и участия другого комплементора. Ситуацию можно подкрепить примером, когда экосистема ведет разработку моделей машинного обучения, как это сделал Яндекс в 2020 году, создав в Яндекс.Облако сервис Yandex DataSphere. Качество продукта комплементоров зависит от других участников, а также популярность этой платформы зависит от количества потенциальных потребителей итогового продукта.

## 2. Монополия

В этом случае потребители оценивают полезность экосистемы по тому, какое число производителей имеют обе платформы-комплементоры. В

свою очередь, производителям важно количество присоединившихся потребителей к этой платформе. Также для каждой из групп имеется цена присоединения к платформе: для каждой из групп разная, которая может иметь реальное денежное выражение, так и оцениваться в иных затратах – времени, транзакционными издержками. На полезность комплементора оказывает влияние полезность товара или услуги другой платформы экосистемы.

Следуя логике Армстронга, можно сказать, что при монопольном положении экосистемы потери общего благосостояния от монополистической деятельности экосистемы, возрастают в квадратичной зависимости от численности каждой из групп. В случае комплементоров – их численность усиливает потери друг друга

### **3. Конкуренция между экосистемами (single-homing)**

Предположим наличие двух идентичных экосистем А и В со схожей структурой. Экосистемы конкурируют друг с другом в рамках модели линейного города Хотеллинга[2]. Причем конкуренция происходит не только за потребителей, но и за производителей на двух платформах-комплементорах (см. Рисунок 2). Каждый потребитель из числа  $n$  оценивает выгоду от участия в одной и второй платформе и выбирает наиболее выгодную. Подобные решения принимают и производители, которые могут присоединиться к одной из платформ К (или М) в экосистемах А и В.

Каждая группа выбирает к какой экосистеме присоединиться, сравнивая доступные полезности. Также здесь существует аналог транспортных затрат в модели Хотеллинга ( $t$ ) – параметры дифференциации продукта, которые описывают конкурентоспособность сторон рынка.

Решая системы уравнений, выражающие задачу максимизации прибыли экосистемой можно указать на особенности ценообразования для всех трех групп участников экосистемы. Цены для каждой из групп скорректированы (по сравнению с оригинальными моделями Хотеллинга и Армстронга) на внешнюю выгоду для экосистемы при привлечении дополнительного участника на противоположной стороне экосистемы, при этом структура коэффициентов для потребителей и для комплементоров разная. У комплементоров обнаруживается два эффекта, которые описывают взаимосвязь числа производителей на каждой платформе-комплементоре в экосистеме: «прямой эффект» (выражающий косвенные сетевые эффекты) и «опосредованный» эффект (выражающий петлю обратной связи).

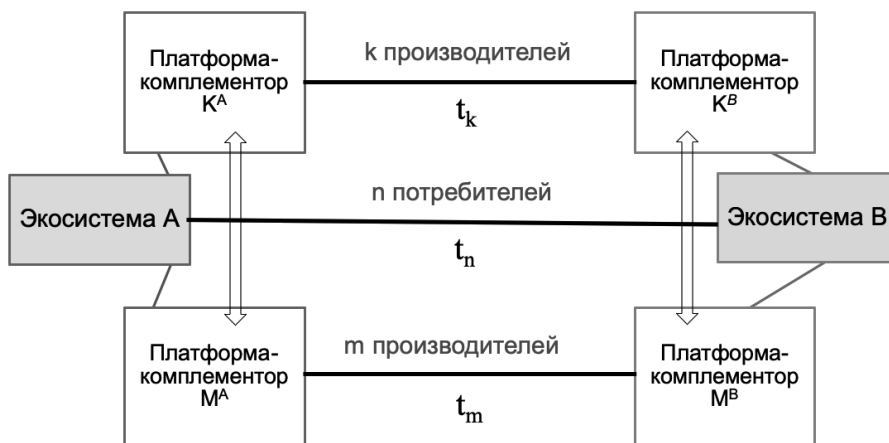


Рис. 2. Конкуренция двух экосистем по линейному городу Хотеллинга.  
Источник: составлено автором

#### 4. Конкуренция между экосистемами (multi-homing)

Представленная модель называется моделью «узких мест в конкурентной борьбе», так как она поднимает важные аспекты в функционировании платформ (и экосистем) – проблему набора широкой аудитории, а также несимметричности условий по отношению к разным сторонам платформы. В отличие от модели Армстронга[1], в рассматриваемом случае экосистемы нет симметричности в сторонах: потребительская сторона представлена одной группой, а сторона производителей – двумя, стоит рассмотреть две зеркальные ситуации:

- 1) Потребители не выбирают между экосистемами, могут присоединиться к обеим (multi-homing), а производители должны выбрать (single-homing). Эта ситуация свойственна для рынка социальных сетей, электронной почты.

Результаты моделирования показывают, что в этом случае, при любом равновесии количество потребителей в экосистеме выбирается таким образом, чтобы максимизировать совместный излишек экосистемы и комплементоров, а интересы потребителей игнорируются. Если в привлечении потребителей нет внешних факторов, в каждой экосистеме количество потребителей будет ниже рыночного.

Завышенные цены для какой-то из сторон экосистемы на рынке с возможностью множественного подключения, не обязательно приводят к сверхприбыли для экосистем, поскольку под давлением конкуренции экосистемы могут быть вынуждены перераспределять свои монопольные доходы той стороне, которая является single-homing. Провал рынка является неоптимальным балансом цен на обеих сторонах платформы/экосистемы.

- 2) Производители могут присоединяться к любой экосистеме (multi-homing), а потребители – нет (single-homing). Такая ситуация свойственна для рынка мобильных телефонов, сотовых операторов, операционных систем, голосовых ассистентов. В этом случае, наоборот, игнорируются интересы комплементоров. Однако тут наблюдается кумулятивный эффект: имеется мультипликатор, который может способствовать большей привлекательности подключения к экосистеме.

## 5. Заключение

Анализ поведения экосистем и их участников может раскрыть возможные пути развития отраслей, связанных с цифровыми технологиями: большими данными, искусственным интеллектом, интернетом вещей. В связи с множественными изменениями в уровне технологии и в способах взаимодействий между акторами регуляторы во всех странах сталкиваются с новыми вызовами и находятся в процессе поиска различных способов оценки поведения участников рынков.

## Список литературы

- [1] Armstrong M., “Competition in two-sided markets”, *The RAND Journal of Economics*, **37**:3 (2006), 668–691.
- [2] Hotelling H., “Stability in Competition”, *The Economic Journal*, **39**:153 (1929), 41–57.

## Economic analysis of the digital ecosystems’ participants behavior Morosanova A. A.

Modern digital technologies, in particular artificial intelligence, are the basis for the existence of digital ecosystems that operate in a variety of areas and, consequently, markets. The presented study concerns the analysis of the behavior of ecosystem participants, which is supported by mathematical modeling. The findings from the analysis for various market structures indicate multiple effects, not only direct and indirect

network effects, but also “feedback loops” that need to be taken into account when making business and management decisions.

*Keywords:* digital ecosystems, competition policy, monopolies, platforms, artificial intelligence

## References

- [1] Armstrong M., “Competition in two-sided markets”, *The RAND Journal of Economics*, **37**:3 (2006), 668–691.
- [2] Hotelling H., “Stability in Competition”, *The Economic Journal*, **39**:153 (1929), 41–57.

# Минимальная логика для анализа технологий

В. И. Шалак<sup>1</sup>

Технологиями могут быть названы алгоритмы, результат выполнения которых является результатом протекания последовательности внешних физических процессов, инициируемых активным агентом. В докладе определен язык и семантика технологий, а также аксиоматизирована минимальная логика технологий. Одной из возможных областей применения предложенного языка является эволюционное программирование с целью адаптивной оптимизации существующих технологий и поиска новых.

**Ключевые слова:** технологии, логика технологий, натуральные алгоритмы, эволюционное программирование.

## 1. Введение

Общее неформальное определение понятия алгоритма может быть сформулировано следующим образом:

*Алгоритм – это общепонятное и однозначное предписание, какие и в каком порядке производить действия, чтобы получить искомый результат.*

Под него подпадают не только символьные вычисления машин Тьюринга, но и более широкий класс явлений, выходящих за рамки операций с символами и существенным образом связанных с оперированием физическими предметами и управлением внешними естественными природными процессами для достижения конкретных целей. Эти явления я буду называть *технологиями* или *натуральными алгоритмами*.

Простейший пример: «Если в комнате темно, включи свет». Все, что могут непосредственно делать люди, – это механически перемещать в различных направлениях свое тело или конечности. В их арсенале нет действия “включить свет”, но они могут *подойти к выключателю и нажать* на него, чтобы *зажечь лампочку*.

Поэтому в развернутом виде предписание могло бы выглядеть следующим образом: «Если в комнате темно, *подойди к выключателю и нажми на кнопку, чтобы тем самым замкнуть электрическую цепь,*

---

<sup>1</sup>Шалак Владимир Иванович — доктор философских наук, ведущий научный сотрудник Института философии РАН, e-mail: shalack@mail.ru.

Shalack Vladimir Ivanovich — DSc in Philosophy, Leading Research Fellow of Institute of Philosophy, Russian Academy of Sciences.

по которой потечет электрический ток и нагреет спираль лампочки до состояния свечения, чтобы она осветила комнату».

Данный натуральный алгоритм характеризуется следующими чертами:

- 1) Эмпирическое знание  $C$  о положении дел – в комнате темно.
- 2) Конкретные манипуляции  $d$ , которые должен произвести агент – подойти к выключателю и нажать на кнопку.
- 3) Физический процесс протекания электрического тока и нагревания спирали лампочки  $P$ . Манипуляции агента всего лишь запускают внешний физический процесс, который далее протекает без активного участия агента, но является необходимой составляющей алгоритма.
- 4) И наконец, цель выполнения алгоритма  $G$  – освещение комнаты.
- 5) Натуральный алгоритм (технология) реализуется не в абстрактном математическом, а в реальном времени в окружении реальных природных процессов.
- 6) Манипуляции  $d$  активного агента связывают в единые цепочки различные физические процессы  $P$ , которые без его участия никогда бы не произошли в этой очередности и не привели к требуемому результату  $G$ .
- 7) Элементарный кирпичик натуральных алгоритмов может быть описан в виде правила «Если имеет место  $C$ , произведи манипуляции  $d$ , чтобы запустить процесс  $P$  для достижения искомой цели  $G$ », или кратко " $C \rightarrow d:P:G$ ".

Сложный натуральный алгоритм можно представить, как набор элементарных правил.

Очевидно, что логика для описания и анализа технологий должна совмещать в себе черты временной и динамической логик.

## 2. Основной результат

Для простоты был взят язык пропозициональной логики, расширенный множеством элементарных действий *Act*, которые может непосредственно произвести агент, а также двумя двухместными временными операторами *Since* и *Until*, которые помимо задания временных отношений могут быть использованы для представления ограниченных во времени

процессов. Эти операторы можно по аналогии с ограниченными кванторами понимать, как ограниченные временные операторы  $H$  и  $G$ . Если  $HA$  интерпретируется, как "всегда было  $A$ ", то  $S(B,A)$  понимается, как "с некоторого момента в прошлом, когда было  $B$ , всегда имело место  $A$ ". Аналогично для будущего  $U(B,A)$  — "до некоторого момента в будущем, когда станет истинно  $B$ , всегда будет иметь место  $A$ ".

Так как нас интересует минимальная временная логика, в качестве модельной была взята структура временной логики  $Kt$ . Интерпретация элементарных действий, поскольку внешнее физическое время обладает приоритетом, согласована с отношением временного порядка.

Построена полная аксиоматизация логики, в языке которой можно определить понятие выполнения элементарной технологии.

$\langle C \rightarrow d : P : G \rangle A =_{def} C \wedge \langle d \rangle U(A, P)$  — «В результате некоторого выполнения технологии " $C \rightarrow d : P : G$ " имеет место  $A$ ».

Поскольку технологии реализуются в реальном мире в окружении других в общем случае неподконтрольных нам процессов, не каждая попытка их выполнения приводит к желаемой цели. Утверждение об успешном выполнении технологии " $C \rightarrow d : P : G$ " может быть представлено следующим образом:

$! \langle C \rightarrow d : P : G \rangle A =_{def} C \wedge \langle d \rangle U(G \wedge A, P)$  — «В результате некоторого успешного выполнения технологии " $C \rightarrow d : P : G$ " имеет место  $A$ ».

Предложенный язык и логика могут быть взяты в качестве минимальных для описания и анализа технологий, так как не налагают никаких ограничений на характер временной упорядоченности событий внешнего мира. В будущем в зависимости от области приложения можно рассмотреть варианты линейного и древовидного порядков, дискретного, плотного или непрерывного времени. В последнем случае мы получим язык и логику для совместного описания и анализа, например, дискретных управляющих действий и непрерывных процессов, что имеет отношение к аналоговым алгоритмам.

### 3. Возможные приложения в ИИ

Эволюционное (генетическое) программирование — направление исследований в ИИ специальных алгоритмов самообучения, опирающихся на известные генетические механизмы изменчивости и наследования полезных изменений. Эти алгоритмы позволяют адаптивным образом из начальных заготовок программ получать более эффективные программы



для решения конкретных задач. Сложная технология может быть представлена в виде набора простых по образу и подобию продукционного программирования. Представление сложных технологий в виде набора элементарных " $C \rightarrow d:P:G$ " хорошо подходит для приложения к ним методов эволюционного программирования, поскольку структурно отделяет эмпирическую информацию  $C$  от действий активного агента  $d$ , инициируемых им процессов  $P$  и преследуемых целей  $G$ , что позволяет реализовать механизмы изменчивости и наследования отдельно по каждой из этих компонент. Обратная связь со внешней средой реализуется посредством оценки успешности или неуспешности выполнения технологий.

Натуральные алгоритмы в данном представлении позволяют описывать, анализировать и моделировать на компьютерах не только инженерные технологии, но и различные закономерности функционирования социальной сферы. Благодаря возможности применения алгоритмов эволюционного программирования может быть поставлена задача автоматизации поиска и создания новых более эффективных технологий и моделей поведения.

### **Minimal logic for technology analysis** **Shalack V.I.**

Technologies are algorithms, the result of which is the result of a sequence of external physical processes initiated by an active agent. We define the language and semantics of technologies. Also the minimal logic of technologies is axiomatized. One of the possible areas of application of the proposed language is evolutionary programming for adaptive optimization of existing technologies and the search for new ones.

*Keywords:* technologies, logic of technologies, natural algorithms, evolutionary programming.

## **К сведению авторов публикаций в журнале «Интеллектуальные системы. Теория и приложения»**

В соответствии с требованиями ВАК РФ к изданиям, входящим в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых могут быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, статьи в журнал «Интеллектуальные системы. Теория и приложения» предоставляются авторами в следующей форме:

1. Статьи, набранные в пакете  $\text{\LaTeX}$ , предоставляются к загрузке через WEB-форму [http://intsysjournal.org/generator\\_form](http://intsysjournal.org/generator_form).
2. К статье прилагаются файлы, содержащие название статьи на русском и английском языках, аннотацию на русском и английском языках (не более 50 слов), список ключевых слов на русском и английском языках (не более 20 слов), информация об авторах: Ф.И.О. полностью, место работы, должность, ученая степень и/или звание (если имеется), контактные телефоны (с кодом города и страны), e-mail, почтовый адрес с индексом города (домашний или служебный).
3. Список литературы оформляется в едином формате, установленном системой Российского индекса научного цитирования.
4. За публикацию статей в журнале «Интеллектуальные системы. Теория и приложения» с авторов (в том числе аспирантов высших учебных заведений) статей, рекомендованных к публикации, плата не взимается. Оттиски статей авторам не предоставляются. Журнал распространяется по подписке, экземпляры журнала рассылаются подписчикам наложенным платежом. Условия подписки публикуются в каталоге НТИ «Роспечать», индекс журнала 64559.
5. Доступ к электронной версии последнего вышедшего номера осуществляется через НЭБ «Российский индекс научного цитирования». Номера, вышедшие ранее, размещаются на сайте <http://intsysjournal.org>, и доступ к ним бесплатный. Там же будут размещены аннотации всех публикуемых статей.

---

Подписано в печать: 15.03.22

Дата выхода: 25.03.22

Тираж: 200 экз.

Цена свободная

Свидетельство о регистрации СМИ: ПИ № ФС77-58444 от 25 июня 2014 г.,  
выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных  
технологий и массовых коммуникаций(Роскомнадзор).