

Том **73**
Выпуск **2**



ISSN 2079-0279

2023

ТРУДЫ

**ИНСТИТУТА СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

<http://www.ISA.ru>

Системная диагностика социально-экономических процессов

Интеллектуальный анализ данных и распознавание образов

Математическое моделирование

Системный анализ в медицине и биологии

Управление рисками и безопасностью



Труды Института системного анализа Российской академии наук (ИСА РАН)

<http://www.isa.ru/proceedings/>

Журнал основан в 2002 году
Журнал выходит ежеквартально

Учредитель

Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление»
Российской академии наук» (ФИЦ ИУ РАН)
119333, г. Москва, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2, тел.: 8 (499) 135-62-60, e-mail: frccsc@frccsc.ru, <http://www.frccsc.ru/>

Главный редактор

Попков Ю.С., академик РАН,
119312, г. Москва, проспект 60-летия Октября, д. 9
тел. 8 (499) 135-42-22, e-mail: popkov@isa.ru

Редакционный совет

Попков Юрий Соломонович, академик РАН
(председатель Редакционного совета), г. Москва, Россия
Виссен Леонард (Leonardus J.G. van Wissen), проф., г. Амстердам, Нидерланды
Константинов Игорь Сергеевич, д.т.н., г. Белгород, Россия
Соловьев Александр Владимирович, д.т.н.,
(заместитель главного редактора) г. Москва, Россия
Шмульян Борис Лейбович, проф., г. Тель-Авив, Израиль
Щербов Сергей Яковлевич, проф., г. Вена, Австрия

Редакционная коллегия

Алескеров Фуад Тагиевич, д.т.н., г. Москва, Россия
Ашимов Абдыкаппар Ашимович, д.т.н., г. Алматы, Казахстан
Белов Сергей Павлович, д.т.н., г. Белгород, Россия
Булычев Александр Викторович, к.т.н. (ответственный секретарь), г. Москва, Россия
Бурков Владимир Николаевич, д.т.н., г. Москва, Россия
Войтишек Антон Вацлавович, д. ф.-м.н.,
г. Новосибирск, Россия
Геловани Виктор Арчилович, академик РАН,
г. Москва, Россия
Ильин Александр Владимирович, чл.-корр. РАН,
г. Москва, Россия

Крутько Вячеслав Николаевич, д.т.н., г. Москва, Россия
Лексин Владимир Николаевич, д.э.н., г. Москва, Россия
Лившиц Вениамин Наумович, д.э.н., г. Москва, Россия
Магницкий Николай Александрович, д.ф.-м.н., г. Москва, Россия
Мижидон Арсалан Дугарович, д.т.н., г. Улан-Удэ, Россия
Петровский Алексей Борисович, д.т.н., г. Москва, Россия
Смирнов Александр Викторович, д.т.н., г. Санкт-Петербург, Россия
Тищенко Виктор Иванович, к.филос.н., г. Москва, Россия
Швецов Александр Николаевич, д.э.н., г. Москва, Россия

Редакция

Шибаета Л.С. (заведующая редакцией)

Адрес редакции

117312, г. Москва, проспект 60-летия Октября, д. 9,
E-mail: tisa@isa.ru, тел. 8 (499) 135-24-33, 8 (926) 490-87-87

Научный журнал «Труды Института системного анализа Российской академии наук (ИСА РАН)» публикует материалы по широкому кругу фундаментальных проблем развития методологии системного анализа и ее приложений к решению разнообразных задач в сфере науки и практики. Журнал предназначен для научных сотрудников, инженеров и исследователей, работающих в рамках этой проблематики, а также для политиков, сотрудников государственных и муниципальных органов, специалистов предприятий и представителей общественных организаций. Правила подготовки статей для публикации в журнале, а также правила их рецензирования приведены на сайте журнала.

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-65718 от 20 мая 2016 г.
Подписной индекс журнала – 36089 в электронном каталоге ГК «УРАЛ-ПРЕСС» (<http://ural-press.ru/>).
Журнал включен в перечень ведущих рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

© Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук»

Содержание

Системная диагностика социально-экономических процессов	3
Реорганизация муниципального пространства: российские реформы в сопоставлении с международной практикой (А.Н. Швецов)	3
Социально-философский анализ деятельности человека в окружающем мире (Ю.В. Пазюк, В.П. Ефимова, С.Н. Осипов)	13
Прогнозирование развития экономики российских регионов с учетом нового классификатора видов экономической деятельности (Д.М. Галин, И.В. Сумарокова)	26
Интеллектуальный анализ данных и распознавание образов	40
Нейросетевой метод генерации последовательности символов для синтеза обучающей выборки изображений текста (П.К. Злобин, Ю.С. Чернышова, А.В. Шешкус, В.В. Арлазаров)	40
Сферические ограничения в триплетной функции потерь (К.К. Сулов, А.В. Шешкус, В.Л. Арлазаров)	50
Математическое моделирование	59
Система модельно-ориентированного программирования (Л.В. Круглов)	59
Computer science and information systems: implementation features in education during the pandemic (L.A. Reingold, O.V. Klychikhina, A.V. Solovyev)	70
Алгоритмические решения задачи фильтрации в стохастической модели информационного противоборства (И.С. Полянский, К.О. Логинов)	80
Синтез управлений нелинейным динамическим объектом с ограниченными возмущениями и использованием SDC-метода (Ладжал Брахим)	90
Системный анализ в медицине и биологии	100
Проблема экологии питания: системный анализ и IT-решение (Н.С. Потемкина, В.Н. Крутько, А.В. Халявкин, А.М. Маркова)	100
Выявление факторов риска острых нарушений мозгового кровообращения на основе интеллектуального анализа историй болезни (В.В. Донитова, Д.А. Киреев, Б.А. Кобринский, И.В. Смирнов, Е.В. Титова)	111
Управление рисками и безопасностью	123
Deception-решения в системе экономической безопасности банка (Г.В. Федотова, Ю.А. Капустина, Р.Х. Ильясов, Цицигэ)	123

PROCEEDINGS OF THE INSTITUTE FOR SYSTEMS ANALYSIS OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

IN THIS ISSUE

System diagnostics socio-economic processes	3
Reorganization of the municipal space: Russian reforms against the international practice (<i>A.N. Shvetsov</i>).....	3
The vital activity of a person in the surrounding world. Socio-philosophical analysis: interdisciplinary approach (<i>Yu.V. Pazyuk, V.P. Efimova, S.N. Osipo</i>)	13
Forecasting development of economy of Russian regions with taking the new classification of kinds of economic activities into account (<i>D.M. Galin, I.V. Sumarokova</i>)	26
Data Mining and Pattern Recognition	40
Neural network method for character sequence generation for text images training dataset synthesis (<i>P.K. Zlobin, Y.S. Chernyshova, A.V. Sheshkus</i>).....	40
Spherical constraints in the triplet loss function (<i>K.K. Suloev, A.V. Sheshkus, V.L. Arlazarov</i>)	50
Mathematical Modeling	59
Model-oriented programming system (<i>L.V. Kruglov</i>)	59
Computer science and information systems: implementation features in education during the pandemic (<i>L.A. Reingold, O.V. Klychikhina, A.V. Solovyev</i>).....	70
Algorithmic solutions problem of filtering in stochastic model of information confrontation (<i>I.S. Polyanskii, K.O. Loginov</i>).....	80
Synthesis Control of a Nonlinear Dynamic Object with Limited Perturbations and Using the SDC-Method (<i>Ladjal Brahim</i>)	90
System analysis in medicine and biology	100
The problem of food ecology: system analysis and its solution (<i>N.S. Potemkina, V.N. Krut'ko, A.V. Khalyavkin, A.M. Markova</i>)	100
Retrieving stroke risk factors based on intellectual analysis of electronic health records (<i>V.V. Donitova, D.A. Kireev, B.A. Kobrinskii, I.V. Smirnov, E.V. Titova</i>).....	111
Risk-Management and Security	123
Deception solutions in the system of economic security of the bank (<i>G.V. Fedotova, Yu.A. Kapustina, R.Kh. Ilyasov, Qiqige</i>).....	123

Системная диагностика социально-экономических процессов

Реорганизация муниципального пространства: русские реформы в сопоставлении с международной практикой

А.Н. ШВЕЦОВ

Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», г. Москва, Россия

Аннотация. Муниципальные образования – это наиболее многочисленный класс объектов публичной власти, ее низового уровня (местного самоуправления). Пространственная организация этого множества объектов во всех странах время от времени под влиянием новых политических и экономических обстоятельств подвергается реструктуризации, следствием которой становятся изменения числа и масштабов, экономических и социальных потенциалов муниципалитетов. При осуществлении таких преобразований экономические и политические соображения могут оказывать противоречивое воздействие, требуя в одно и то же время и укрупнения, и уменьшения пространственных параметров муниципальных образований. В связи с этим возникает теоретическая и практическая проблема рационального – сбалансированного с учетом экономических и политических факторов – обоснования (выбора) их размеров. Исследование этой проблемы опирается на разнообразный и длительный международный опыт реформирования пространственной организации муниципалитетов. В контексте этого опыта особое внимание уделено противоречивой политике постсоветских русских муниципальных реформ и контрреформ.

Ключевые слова: *местное самоуправление, муниципальные образования, реформа местного самоуправления, пространственная организация муниципальных образований, русская политика муниципального реформирования, укрупнение муниципалитетов, международная практика реструктуризации территориальной организации муниципалитетов.*

DOI: 10.14357/20790279230201

Введение

Начало 2022 года было отмечено внесением в Государственную думу Федерального Собрания Российской Федерации проекта федерального закона «Об общих принципах организации местно-

го самоуправления в единой системе публичной власти», который был разработан в развитие положений обновленной в 2020 г. Конституции России и призван заменить действующий федеральный закон о местном самоуправлении, принятый в 2003

г. Предложенное обновление законодательства имело целью запустить новый, рассчитанный на 2022-2028 годы, этап реформирования местного самоуправления¹, предусматривающий в качестве главной идеи, помимо встраивания местного самоуправления в единую систему публичной власти, коренное преобразование пространственной структуры муниципальных образований, а именно: переход на одноуровневую систему местного самоуправления, состоящую только из городских и муниципальных округов с упразднением муниципального статуса сельских и городских поселений, которые войдут в состав указанных округов.

Такая реструктуризация в сущности отражает глобальную тенденцию муниципального развития. Пространственная организация местного управления под нарастающим влиянием проблем экономического порядка, с которыми сталкиваются муниципалитеты, претерпевает серьезные количественно-структурные перемены, следствиями которых становятся уменьшение количества муниципалитетов при увеличении их пространственных размеров, роста численности жителей, расширении полномочий и повышении финансовой устойчивости. Этот процесс идет многие годы и во многих странах – и в федеративных (Канада, Германия и др.) и в унитарных (Франция, Великобритания, Дания и др.) государствах. Практический интерес представляет оценка принимаемых в разных странах решений по реструктуризации муниципального пространства, их обоснований и последствий, сопоставление их между собой и соотнесение с актуальной российской практикой.

1. Канадская практика объединения муниципалитетов

В Канаде в сфере местного самоуправления практически всех провинций (субъектов федерации) процесс реструктуризации муниципалитетов путем их объединения становится все более интенсивным и масштабным². В подоплеке муниципальных слияний лежат сходные мотивы – повышение экономической эффективности оказания муниципальных услуг за счет снижения нерациональных расходов и улучшения координации в управлении развитием

смежно-расположенных и тяготеющих друг к другу деревень, поселков и городов, объединявшихся по этим мотивам в рамках единого административно-территориального образования. Кроме того, усилилось стремление к повышению бюджетной самостоятельности муниципальных образований за счет увеличения доли доходов их бюджетов из так называемых собственных источников и тем самым снижения зависимости муниципальных бюджетов от трансфертов из бюджетов провинций.

В результате изменений наряду с двухуровневой структурой, образуемой небольшими поселенческими муниципалитетами, входящими в состав надпоселенческих муниципалитетов с более широкой зоной охвата, формируется новая одноуровневая подсистема укрупненных муниципальных образований. Сосуществование двух подсистем муниципальных образований дает основания для сравнительного анализа их преимуществ и недостатков. Главное преимущество двухуровневой системы связывается с возможностями перераспределения функций и ресурсов между поселенческими муниципалитетами в границах одной территории. В то же время наличие двух муниципальных уровней влечет за собой рост непроизводительных расходов и дублирование в предоставлении отдельных видов услуг. Двухуровневая система оказывается менее прозрачной и затрудняет понимание налогоплательщиками, какой именно уровень несет ответственность за ту или иную услугу. Наличие двух муниципальных органов власти создает дополнительные бюрократические барьеры на пути принятия эффективных решений.

В качестве преимуществ структуры с большими одноуровневыми муниципалитетами обычно указывают на ее более высокую экономическую эффективность, обусловленную сокращением численности управленческого персонала и снижением соответствующих расходов, исключением дублирования в выполнении административных функций и устранением бюрократических барьеров, рационализацией процедур предоставления услуг, увеличением масштабов страхования, уменьшением закупочных цен в связи с большими объемами закупок, расширением возможностей применения сложного и специализированного технического оборудования. Расширение налоговой базы в новой структуре создает возможности для повышения уровня и более справедливой организации финансирования предоставляемых муниципальных услуг. Повышается управленческая ответственность за счет ее концентрации на одном муниципальном уровне. Создаются условия для более эффективного развития в расширенных территориальных границах сети

¹ Законопроект прошел в Госдуме только первое чтение, его последующему обсуждению и окончательному принятию помешала начавшаяся 24 февраля 2022 г. специальная военная операция.

² При изложении канадской практики муниципальной реструктуризации использованы материалы, ставшие доступными автору в ходе его участия в многолетнем канадско-российском проекте по проблемам федерализма, а также доклад известного канадского эксперта Г. Китчена «Реструктуризация муниципалитетов: можно ли извлечь уроки из опыта Канады?».

объектов транспортной (дороги и мосты), инженерно-коммунальной (водоснабжение, канализация, электросети) и социально-рекреационной (парки, зоны отдыха, библиотеки и пр.) инфраструктуры. Устраняется неэффективная и дорогостоящая межмуниципальная конкуренция, имевшая место в прежней структуре между поселениями, каждое из которых стремилось, во что бы то ни стало привлечь именно к себе тот или иной объект, игнорируя при этом соображения экономической целесообразности его размещения в конкретном месте.

Противники политики муниципальных слияний, естественно, прямо наоборот оценивают последствия такой реструктуризации. В частности, в устранении межмуниципальной конкуренции они усматривают вовсе не благо, а опасность уменьшения и даже утраты стимулов к росту эффективности и снижению издержек. Не без оснований отмечается неоднозначность эффектов экономии на масштабе. Другими словами, они соглашаются с тем, что для некоторых видов услуг укрупнение муниципалитета приведет к заметному выигрышу за счет снижения удельных издержек, но в то же время для других видов услуг эти издержки снизятся не существенно, а для третьих – даже повысятся. Это довольно просто объясняется тем, что максимальная эффективность и наименьшие издержки для разных видов услуг достигаются при различных размерах муниципалитета, т.е. рост эффективности и снижение издержек неодинаковы для дорожных работ, пожарной службы, полиции и зон отдыха. Подвергается сильному сомнению обоснованность надежд на снижение непроизводительных затрат за счет устранения дублирования функций при слиянии муниципалитетов и предсказывается, что в реальности расходы в новой структуре скорее всего сохранятся на максимальном уровне, сложившемся до реструктуризации. Наконец, обращается внимание на реальную опасность утраты при укрупнении муниципалитетов прежних возможностей учета местных предпочтений и особенностей при оказании тех или иных услуг, эффект от которых проявляется только на местном уровне.

Но, конечно же, указания на недостатки новой муниципальной структуры не в силах поколебать уверенность сторонников муниципальной реструктуризации в ее преимуществах и лишь стимулируют поиск мер, компенсирующих возможные негативные последствия реформы. Так, парируя вполне ожидаемые критические замечания по поводу того, что переход к одноуровневой структуре крупных муниципалитетов неизбежно ведет к отдалению местной власти от населения, адепты идеи слияния муниципалитетов обычно указывают на простую и

доступную возможность легкого преодоления этого недостатка путем организации сети «местных комитетов, консультационных и иных дополнительных офисов» с минимальным штатом служащих, предоставляющих определенный набор услуг, консультирующих местных жителей или отвечающих на их вопросы. Аналогично обстоит дело и с другими доводами противников реформы. Скажем, в ответ на упреки по поводу устранения конкуренции предлагается обеспечить ее путем более широкого использования альтернативных способов предоставления муниципальных услуг, например, с привлечением сторонних организаций на договорных условиях.

Альтернативой крупным муниципалитетам в рамках одноуровневой системы местного самоуправления выступают небольшие муниципальные образования с характерными для них преимуществами и недостатками. Говоря о достоинствах небольших муниципальных структур, на первое место обычно выдвигают отнюдь не экономические факторы, а такие их свойства как большая демократичность организации жизнедеятельности на меньшей территории, лучшая доступность местной власти и непосредственная ответственность выборных лиц перед налогоплательщиками. Считается также, что в небольших муниципалитетах более полно учитывается местная специфика, принимаются в расчет различия между городом и сельской местностью, исторические традиции и т.п. Многочисленные малые общины, получая муниципальный статус, приобретают возможность реализации своих разнообразных интересов и противостоят тенденциям к «стандартизации» муниципальных услуг и «выравниванию» затрат на их предоставление. Сосуществование множества муниципалитетов содействует установлению конкурентной среды, стимулирующей их к более скрупулезному учету и контролю собственных затрат предоставляя для этого более широкие информационные возможности для сравнительного анализа показателей экономической эффективности оказания тех или иных услуг в разных муниципалитетах. Но в то же время увеличение количества муниципалитетов сопряжено с ростом численности выборных лиц и наемного персонала, возрастанием административных расходов. Муниципальная конкуренция может превратиться в дорогую и неэффективную, а стремление к получению эффектов от экономии на масштабах при оказании услуг наталкивается на объективные ограничения, которые невозможно преодолеть в рамках отдельных небольших муниципальных образований, а требуется использование механизмов межмуниципальных взаимодействий (соглашений или специальных управляющих структур).

2. Тенденции европейской реструктуризации муниципалитетов

Процессы реструктуризации муниципальных образований характерны и для Европейского Союза, в разных странах которого уже осуществлены, проводятся или планируются соответствующие реформы [1–5]. Здесь прослеживаются две основные тенденции. Одна – к укрупнению общин в целях повышения административной результативности и экономической эффективности местного самоуправления. Этот путь характерен, в первую очередь, для североевропейских стран и регионов (скандинавские государства, Англия, северогерманские земли).

Так, в Германии проведенная в 70-е годы реформа административно-территориального деления страны привела почти к троекратному (с 22000 до 8500) сокращению количества общин. В Швеции в результате укрупнений коммун, проведенных в 1952 и 1974 гг., их количество уменьшилось почти в восемь раз – с 2282 до 290 [4]. В Дании в результате реформы 1970 г. число муниципалитетов было уменьшено почти в пять раз (с 1300 до 275) и планируется сокращение еще почти втрое [1].

Делая упор на сугубо экономических эффектах (снижение издержек или повышение эффективности управления), в указанных странах все же осознают, что подобный подход ухудшает возможности жителей влиять на муниципальную политику и участвовать в местном самоуправлении. Поэтому предпринимаются специальные меры, компенсирующие негативные последствия укрупнения общин. Так, для усиления роли жителей в местном самоуправлении механизмы представительской демократии дополняются инструментами прямой и партисипативной демократии [2].

Другая тенденция реструктуризации муниципального пространства характерна для южноевропейских стран и регионов (Франция, Италия, Австрия, южногерманские земли и др.), где сохраняется исторически сложившаяся структура муниципального пространства, представленная преимущественно мелкими поселениями. В этой части Европы для повышения административной результативности и экономической эффективности местного самоуправления используются организационно-правовые формы межмуниципальной кооперации.

Таким образом, трансформации муниципального пространства хотя и стали весьма распространенной политикой, но они все же не носят кардинального и массового характера, к ним стараются прибегать не часто, изменения протекают более монотонно и последовательно, их стараются гото-

вить тщательно (от нескольких лет до нескольких десятилетий), прибегая к всестороннему и широкому обсуждению, после чего стараются организованно осуществлять [5]. Сформированные таким образом пространственные структуры местного самоуправления характеризуются устойчивостью и эффективностью.

3. Российские особенности муниципальных преобразований

Особняком стоит современный (постсоветский) опыт преобразований муниципального пространства. Для него характерны импульсивные трансформации, в ходе которых на протяжении всего двух десятилетий трижды существенно менялся численный состав и пространственная организация муниципальных образований.

При этом колебания количества муниципальных образований сопровождались изменениями их пространственных параметров – размеров (площади) и конфигурации (границ) территориальных локальностей, подпадающих под юрисдикцию органов местного самоуправления. В зависимости от вектора этих изменений расширялся или сокращался социально-экономический потенциал муниципальных образований (численность и структура жителей, состав предприятий, виды и запасы природных ресурсов, обеспеченность объектами социальной, производственной и транспортной инфраструктуры и т.п.). При этом каждое обновление муниципальной «нарезки» влекло за собой наряду с изменениями факторов, составляющих экономическую основу местного самоуправления и определяющих его доходный потенциал, трансформацию состава и объема расходных обязательств местного самоуправления, определяющих затраты местных бюджетов.

Так, в первой половине 90-х годов количество территориальных единиц под юрисдикцией местных органов власти по сравнению с дореформенным (советским) периодом было резко и сильно уменьшено (более чем в 2,5 раза). Вследствие слияний или поглощений около тридцати тысяч низовых единиц административно-территориального деления советской России (районы, города и их районы, поселки и т.п.) были трансформированы в двенадцать тысяч муниципальных образований. В новой пространственной структуре местного самоуправления муниципальными образованиями оказались только 620 из 1060 городов (менее 60%), 100 из 340 городских районов (только каждый третий), 630 из более 2000 поселков (менее трети) и всего около 10 тыс. из 150 тыс. сельских населенных пунктов (не более 7%).

Сформированная конфигурация муниципального пространства оставалась неизменной недолго и уже в 2003 г. «маятник» трансформаций качнулся в противоположную сторону – начался «муниципальный передел», главный результат которого состоял в увеличении более чем в два раза числа муниципальных образований в стране. Если накануне этой реструктуризации в России насчитывалось 11599 муниципальных образований [6], то по ее итогам – 24510 муниципальных образований, в том числе 520 городских округов, 1819 муниципальных районов, 20109 сельских и 1826 городских поселений [7]. При общем увеличении числа муниципальных образований в стране в регионах изменения имели разнонаправленный характер. Так, в 11 регионах число муниципальных образований даже несколько уменьшилось, в 17 регионах – осталось на дореформенном уровне или выросло несущественно (менее чем на 10%), но в 29 регионах рост числа муниципальных образований составил от 3 до 10 раз, а в 18 регионах количество муниципалитетов возросло более чем в 10 раз [7].

На этом колебания «маятника» пространственных трансформаций не закончились. В 2008–2010 гг. начались процессы новых структурных изменений, следствием которых стало продолжающееся до настоящего времени уменьшение числа муниципальных образований³. На 1 января 2017 г. их общее число сократилось до 22327, снизилось и число муниципальных районов – до 1784, а также сельских – до 18101 и городских поселений – до 1589, но при этом число городских округов увеличилось до 567. Указанные преобразования в региональном разрезе идут не повсеместно и неравномерно – почти в половине субъектов Российской Федерации вообще никаких структурных изменений не происходило, в то время как в регионах Центрального (Воронежская, Смоленская и Тверская области) и Северо-Западного федеральных округов (Архангельская, Вологодская и Псковская области) процесс принял массовый характер [9]. Катализатором процесса укрупнения муниципалитетов стали принятые в 2019 г. поправки в Федеральный закон «Об общих принципах организации местного самоуправления в Российской Федерации», которыми был введен новый вид муниципальных образований – муниципальный округ. В результате уже по состоянию на 1 января 2021 г.

в субъектах РФ появилось 100 муниципальных округов. В числе лидеров – Пермский край (18 округов), Ставропольский край (16), Кемеровская область (13) и Нижегородская область (11).

Реформа 2022 г. должна завершить процесс укрупнения муниципальных образований, в результате которого нынешнее количество муниципальных образований (более 20 тысяч) сократится не менее чем в два раза. Это станет следствием преобразования двухуровневой системы местного самоуправления (муниципальные районы с муниципальными городскими и сельскими поселениями) в одноуровневую систему путем образования муниципальных и городских округов с упразднением муниципальных образований нижнего уровня — сельских и городских поселений.

4. Предпосылки, содержание и последствия «маятниковых» трансформаций муниципального пространства

Причины отмеченной повышенной изменчивости структурной организации муниципального пространства, на наш взгляд, коренятся в противоречиях становления новой (постсоветской) системы местного самоуправления⁴. Их множество и они разнообразны: принципиальные и второстепенные, идейно-теоретические и прикладные, объективные и личностные, сложные и не очень. Но все они – порождение огромных трудностей переходного периода, обусловленных масштабом и сложностью реформируемого объекта, представленного многими тысячами разностатусных и сильно различающихся по географическому положению, размерам, потенциалам и уровням развития, а также местным культурно-историческим традициям муниципальных образований, в одночасье оказавшихся в условиях всеобщих и кардинальных социально-экономических, административно-территориальных и политических преобразований, усугубленных системным кризисом распада СССР, а также чередой кризисов становления новой экономики России и ее встраивания в мировое рыночное хозяйство. Кроме того, местное самоуправление столкнулось и с новыми вызовами: депопуляцией сельской местности и малых городов, старением населения, миграционными процессами.

В этих обстоятельствах принималось множество поспешных и непоследовательных решений, следствием которых стало становление местно-

³ Эта устойчивая тенденция была нарушена в 2014 г. всплеском количества муниципальных образований, обусловленным воссоединением Российской Федерации с Республикой Крым. На полуострове было образовано 289 муниципальных образований, в том числе 11 городских округов, 14 муниципальных районов, 4 городских и 250 сельских поселений, а также 10 внутригородских муниципальных образований в Севастополе [8].

⁴ Всесторонний анализ предпосылок, особенностей и проблем становления местного самоуправления в России 90-х годов дан в [10].

го самоуправления рывками и откатами по схеме «реформа-контрреформа». Муниципалитеты то разукрупняли, то объединяли, то передавали им дополнительные права, то забирали, то расширяли их налоговые полномочия, то сужали, то вводили выборность местных глав, то упраздняли и т.п. И каждый раз, едва принимались одни нововведения, как начинались разговоры о необходимости разработки новых концепций, стратегий или программ продолжения реформ, не очень беспокоясь выяснением, почему же предыдущие решения оказались неудачными и зачем надо, не доведя одно дело до конца, затевать разработку нового курса развития местного самоуправления?

Порождением такой политики стало стремление путем пространственно-структурных манипуляций (то уменьшая, то увеличивая количество муниципальных образований) быстро и одинаково стандартно на неоднородном пространстве всей страны справиться с массой разнообразных сущностных проблем становления нового порядка местного самоуправления. При такой массовой и одномоментной реорганизации системы трудно было обеспечить всестороннюю и глубокую обоснованность решений, которая зачастую подменялась энергичной, но легковесной и противоречивой общественно-политической риторикой⁵, получавшей юридическое подкрепление в быстро и небрежно скроенном законодательстве.

Первая «муниципальная нарезка» 90-х годов стала следствием постсоветского перехода к системе местного самоуправления западноевропейского образца. Местные органы из низового звена государственной властно-субординационной иерархии органов управления были трансформированы в самостоятельный, не входящий в систему органов государственной власти институт. Была осуществлена общероссийская унификация видов административно-территориальных единиц как объектов местного самоуправления. Административные районы, города (республиканского, краевого, областного, окружного значения), городские районы и округа, поселки городского типа, сельские администрации и сельские населенные пункты – все эти различные виды таксономических единиц стали *муниципальными образованиями* с одинаковым набором предметов ведения. А органы местного самоуправления любых муниципальных образований вне зависимости от реального состава и

объема задач обеспечения их жизнедеятельности, а также имеющихся для этого ресурсных возможностей приобрели одинаковый статус и равные полномочия. Проведенная унификация игнорировала объективные различия в организационных и экономических возможностях реализации «общих принципов организации местного самоуправления» и «финансовых основ местного самоуправления» в населенных пунктах разных видов – в региональных «столицах» и малых городах, в поселках городского типа и сельских поселениях, в индустриальных центрах и «наукоградах», в городских и сельских районах. Другим структурным следствием реформы стала допустимость вхождения одного муниципального образования в состав другого, что порождало проблемы пересекающихся ареалов местного самоуправления.

Нарастание противоречий в рамках выстроенной системы стало поводом для проведенного в начале 2000-х годов реформатирования пространственной организации местного самоуправления. В целях приближения местной власти к населению, разграничения полномочий, повышения муниципальной автономии вводилась двухзвенная поселенческо-районная структура⁶. Однако организационно-статусные аспекты реорганизации оказались оторванными от бюджетно-налоговых решений. В результате чего структура муниципальных образований видоизменялась до того, как были определены финансовые основы их функционирования, что привело к ухудшению бюджетной обеспеченности муниципальных образований по сравнению с периодом 90-х годов. Ряд важных вопросов (например, кадровых) вообще выпал из поля зрения. Возобладал единообразно жесткий подход, не предусматривавший учета уровня и особенностей развития разных регионов, накопленного в них опыта организации местного самоуправления и т.д.⁷ Состав и размещение объектов социальной инфраструктуры не вписывались в новую двухзвенную структуру муниципальных образований.

⁶ Новая схема территориальной организации местного самоуправления получила юридическое закрепление в принятой 6 октября 2003 г. обновленной версии Федерального закона №131-ФЗ «Об общих принципах организации местного самоуправления в Российской Федерации».

⁷ Во многих регионах не поддержали новый этап муниципальной реформы, посчитав его преждевременным. Неприятие реформы региональными и местными властями оказалось настолько сильным, что пришлось дважды продлевать сроки перехода к новому порядку организации местного самоуправления – сначала до 1 января 2006 г., а затем еще на три года – до 1 января 2009 г. Но откладывание сроков не сопровождалось корректировкой главных содержательных вопросов реформы. Высказывавшиеся многими регионами существенные претензии так и не были учтены в федеральном законе.

⁵ На разных этапах говорилось как о полезности укрепления демократии, расширении политической самостоятельности местной власти и ее приближении к населению, так и о необходимости повышения управляемости на местах, укрепления «вертикали власти» на местном уровне, отмене выборности мэров городов и т.п.

Результаты нового «муниципального передела» получились противоречивыми. С одной стороны, местная власть за счет организации по поселенческому признаку и обусловленного этим существенного увеличения числа муниципальных образований существенно приблизилась к населению, но, с другой стороны, самостоятельные управленческие возможности местных органов оказались ничтожными, поскольку свыше 90% муниципальных образований были хронически дотационными, а более 80% вообще не имели бюджетов и осуществляли свою деятельность по смете, являвшейся составной частью районных бюджетов. Функционирование такой системы требовало централизации средств и затем их перераспределения между «неимущими» муниципальными образованиями. Их полная финансовая зависимость от регионального уровня стала благодатной почвой для выстраивания не партнерских, а субординационных отношений между ними – пресловутой «вертикали власти». А в этой логике закономерно возникал и вопрос о повышении управляемости, который решался уменьшением числа объектов управления, для чего, как нельзя лучше, годился простой структурный маневр – укрупнение муниципальных образований, подкрепляемое заменой выборности назначением их глав губернаторами регионов.

Было решено добиваться сокращения количества дотационных поселений (в основном в сельской местности) и повышения сбалансированности местных бюджетов⁸ за счет уменьшения расходов на содержание аппаратов управления, приведения структуры органов местного самоуправления в соответствие с неблагоприятными изменениями демографической ситуации (особенно в сельской местности), а также с размещением производства и трудовых ресурсов, с состоянием транспортной сети.

Новая реструктуризация муниципального пространства пошла по пути, во-первых, упразднения поселенческого звена местного самоуправления путем преобразования составной структуры муниципальных районов с входящими в них муниципалитетами-поселениями в структурно единые городские округа (переход от двухзвенной к однозвенной структуре)⁹, и, во-вторых, укрупнения

муниципалитетов-поселений посредством их объединения в новое муниципальное образование или присоединения к существующему.

Следствием указанных действий стало в очередной раз уменьшение количества и рост размеров муниципальных образований. Государство взяло курс на централизацию сущностных полномочий и наращивание контроля местного самоуправления, нагружая в то же время муниципалитеты не свойственными им функциями и лишая их организационной автономии¹⁰. Но такие меры вторжения «государственного интереса» в вопросы местного развития не дали ожидаемых эффектов ни в экономике расходов, ни в повышении качества местного управления [14].

Заключение

Муниципальное образование – это сложный феномен, противоречиво сочетающий в себе черты как структурного элемента в системе административно-территориального устройства власти, так и экономического субъекта, занятого предоставлением общественных благ. Если принять во внимание первую особенность муниципальных образований, то доминирующей в определении размеров муниципальных образований становится политически мотивированная установка на приближение органов власти к населению, следствием которой становится уменьшение удельных размеров муниципальных образований и вызванное этим увеличением их общего числа. Вторая особенность муниципальных образований делает определяющим экономический императив, который диктует объективную необходимость увеличения единичных размеров муниципальных образований и соответственно сокращения их количества. В настоящее время указанные два начала рассматриваются как взаимоисключающие. По нашему мнению, есть все основания уйти от такой жесткой альтернативности и отдать предпочтение более мягкому варианту, позволяющему компромиссно соединить обе указанные разнокачественные особенности муниципальных образований. Суть предлагаемого подхода заключается в ориентации на формирование экономически и финансово дееспособных муниципальных образований, что

признакам и назначению подлинного городского округа. Как правило, указанному преобразованию предшествует делегирование поселенческими муниципалитетами своих основных полномочий районному уровню. И после этого создание городского округа становится закреплением де-юре того, что уже сложилось де-факто.

¹⁰ Конституционный Суд фактически зафиксировал и признал утрату муниципальными районами и городскими округами значительной части своей самостоятельности вследствие многократного увеличения количества переданных на их уровень для исполнения отдельных государственных полномочий [13].

⁸ По признанию представителей региональных властей, процесс укрупнения муниципальных образований затевался именно с целью оптимизации бюджетных расходов [11].

⁹ При этом власти не смущало, что эта практика не только являлась отступлением от законодательства [7], но и нарушала конституционный принцип осуществления местного самоуправления именно на поселенческом уровне. К тому же создаваемые таким образом мнимые городские округа не соответствуют понятию,

будет вызывать, как правило, их укрупнение (по сравнению с принятой поселенческой моделью), негативные последствия которого связанные с неоправданным отдалением власти от населения следует компенсировать мерами по ее деконцентрации. Нечто подобное в этом роде осуществляется в ходе муниципальной реструктуризации в Канаде, о которой мы говорили ранее.

Для установления размеров муниципальных образований, обеспечивающих их финансово-экономическую дееспособность, потребуется системная оценка широкого набора параметров, в необходимой и достаточной степени характеризующих масштаб и качество социально-экономических потенциалов муниципальных образований – численность и структуру жителей, количество и структуру рабочих мест, налоговую базу, возможности объектов социальной и инженерной инфраструктуры, качество муниципального управления и др.

И в этом случае не обойтись без создания методических принципов и инструментария, которые могли бы помочь в определении критериев финансово-экономической дееспособности муниципальных образований различных видов и в оценке соответствия этим критериям фактических параметров реальных муниципальных образований. Полученные оценки могли бы стать объективным основанием для принятия практических решений по изменению пространственной конфигурации системы муниципальных образований. При этом надо понимать, что решения по рационализации размеров муниципальных образований (доведению таким способом их параметров до тех пороговых значений, при которых можно будет говорить об их финансово-экономической дееспособности и, следовательно, о наличии предпосылок перехода к их устойчивому развитию) сугубо конкретны и определяются в данных (внешних для самоуправленческих территориальных локальностей) социально-экономических условиях (а именно: в действующей бюджетно-налоговой системе, при установленном разграничении предметов ведения и полномочий и др.). Изменившимся условиям будут соответствовать и другие решения.

Отсутствие необходимых законодательных норм и методического инструментария вовсе не означает, что процесс поиска рациональных размеров поселений, имеющих полноценные возможности для реализации права на местное самоуправление, и наделение их адекватным статусом муниципального образования, не идет в реальной жизни. Просто в этих условиях он пробивается в жизнь с большими трудностями и протекает в остроконфликтном режиме, обычном для метода

«проб и ошибок». Вследствие этого решения принимаются не объективно – по основаниям, имеющим мало общего с рациональной оценкой социально-экономических потенциалов поселений. Новый этап муниципальной реформы, вне всякого сомнения, даст множество примеров на этот счет.

Литература

1. Корсби П. Реформы местного самоуправления – опыт Дании и возможности его применения в России // Институциональный, правовой и экономический федерализм в Российской Федерации. 2006. №3.
2. Маркварт Э., Францке Й. Территориальное реформирование местного самоуправления в Германии и России на современном этапе // Пространственная экономика. 2017. № 3. С. 40-61.
3. Маркварт Э., Швецов А.Н. Территориальная организация местного самоуправления и управление городскими агломерациями / Э. Маркварт, А.Н. Швецов. М.: Издательский дом «Дело» РАНХиГС. 2017. 304 с.
4. S. Kuhlmann, H. Wollmann. Verwaltung und Verwaltungsreformen in Europa. Springer VS, Wiesbaden. 2013. 324 p.
5. Schwab Ch., Bouckaert G., Kuhlmann S. The Future of Local Government in Europe. Lessons from Research and Practice in 31 Countries. Nomos Verlagsgesellschaft, Baden-Baden, Germany. 2017. 129 p.
6. Бабичев И.В. Местное самоуправление: вчера, сегодня, завтра // Полития. 2004. №1.
7. Мониторинг хода муниципальной реформы / Консорциум по вопросам прикладных экономических исследований. М.: ИЭПП. 2006. 402 с.
8. Доклад о состоянии местного самоуправления в Российской Федерации / Под ред. Е. С. Шугриной. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Изд-во «Проспект». 2015. 240 с.
9. Доклад о состоянии местного самоуправления в Российской Федерации: Современные вызовы и перспективы развития / Под ред. Е. С. Шугриной. М.: Изд-во «Проспект». 2016. 312 с.
10. Лексин В.Н., Швецов А.Н. Муниципальная Россия. Социально-экономическая ситуация, право, статистика (в пяти томах, 12 книгах). М.: Эдиториал УРСС. 2000-2001.
11. Санжиев Д. Перемещение денег из бюджета в бюджет – «инъекция» для местных бюджетов // Экономика и жизнь. №16 (9632). 2016.
12. Доклад о состоянии местного самоуправления в Российской Федерации: Изменение баланса интересов государственной власти

- и местного самоуправления / Под ред. Е. С. Шугриной. М.: Изд-во «Проспект». 2017. 484 с.
13. *Шугрина Е.С., Петухов Р.В.* Об особенностях изменения территориальных основ местного самоуправления в Московской области на примере Шаховского района // Государственная власть и местное самоуправление. 2017. №2. С. 42–46.
 14. *Петухов Р.В.* Территориальная организация местного самоуправления: последние законодательные новации // Муниципальное имущество: экономика, право, управление. 2017. №3. С. 31–35.

Швецов Александр Николаевич. Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, г. Москва, Россия. Главный научный сотрудник. Доктор экономических наук. Количество печатных работ: свыше 260. Область научных интересов: системный анализ и управление в социально-экономических системах. E-mail: san@isa.ru

Reorganization of the municipal space: Russian reforms against the international practice

A.N. Shvetsov

Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. Municipalities are the most numerous class of objects of public authority, its grassroots level (local self-government). The spatial organization of this multitude of objects in all countries from time to time under the influence of new political and economic circumstances undergoes restructuring, which results in changes in the number and scale, economic and social potentials of municipalities. When implementing such transformations, economic and political considerations can have contradictory effects, requiring at the same time both enlargement and reduction of the spatial parameters of municipalities. In this regard, there is a theoretical and practical problem of rational – balanced, taking into account economic and political factors – justification (choice) of their sizes. The study is based on the diverse and long-term international experience of reforming the spatial organization of municipalities. In the context of this experience, special attention is paid to the contradictory policy of post-Soviet Russian municipal reforms and counter-reforms.

Keywords: *local self-government, municipalities, local self-government reform, spatial organization of municipalities, Russian municipal reform policy, consolidation of municipalities, international practice of restructuring the territorial organization of municipalities*

DOI: 10.14357/20790279230201

References

1. *Korsbi P.* 2006. Reformy mestnogo samoupravleniya – opyt Danii i vozmozhnosti ego primeneniya v Rossii // Institucional’nyj, pravovoj i ekonomicheskij federalizm v Rossijskoj Federacii. [Reforms of local self-government – the experience of Denmark and the possibilities of its application in Russia // Institutional, legal and economic federalism in the Russian Federation]. No.3.
2. *Markvart E., Francke J.* 2017. Territorial’noe reformirovanie mestnogo samoupravleniya v Germanii i Rossii na sovremennom etape // Prostranstvennaya ekonomika. [Territorial reform of local self-government in Germany and Russia at the present stage // Spatial Economics]. No. 3. P. 40–61.
3. *Markvart E., Shvecov A.N.* 2017. Territorial’naya organizaciya mestnogo samoupravleniya i upravlenie gorodskimi aglomeracijami / E. Markvart, A.N. Shvecov. [Territorial organization of local self-government and management of urban agglomerations / E. Markvart, A.N. Shvetsov]. M.: Izdatel’skij dom «Delo» RANHiGS. 304 p.
4. *Kuhlmann S., Wollmann H.* 2013. Verwaltung und Verwaltungsreformen in Europa. – Springer VS, Wiesbaden. 324 p.
5. *Schwab Ch., Bouckaert G., Kuhlmann S.* 2017. The Future of Local Government in Europe. Lessons from Research and Practice in 31 Countries. Nomos Verlagsgesellschaft, Baden-Baden, Germany. 129 p.
6. *Babichev I.V.* 2004. Mestnoe samoupravlenie: vchera, segodnya, zavtra [Local self-government: yesterday, today, tomorrow] // Politika, No. 1.

7. Monitoring hoda municipal'noj reformy / Konsorcium po voprosam prikladnyh ekonomicheskikh issledovanij 2006. [Monitoring the progress of municipal reform / Consortium for Applied Economic Research]. M.: IEPP. 402 p.
8. Doklad o sostoyanii mestnogo samoupravleniya v Rossijskoj Federacii / Pod red. E. S. Shugrinoj. 2-e izd. pererab. i dop. 2015. [Report on the state of local self-government in the Russian Federation / Edited by E. S. Shugrina. 2nd ed. reprint. and additional]. M.: Izd-vo «Prospekt». 240 p.
9. Doklad o sostoyanii mestnogo samoupravleniya v Rossijskoj Federacii: Sovremennye vyzovy i perspektivy razvitiya / Pod red. E. S. Shugrinoj. 2016. [Report on the state of local self-government in the Russian Federation: Current challenges and development prospects / Edited by E. S. Shugrina]. M.: Izd-vo «Prospekt». 312 p.
10. *Leksin V.N., Shvecov A.N.* 2000-2001. Municipal'naya Rossiya. Social'no-ekonomicheskaya situaciya, pravo, statistika (v pyati tomah, 12 knigah). [Municipal Russia. Socio-economic situation, law, statistics (in five volumes, 12 books)]. M.: Editorial URSS.
11. *Sanzhiev D.* 2016. Peremeshchenie deneg iz byudzheta v byudzhet – «in'ekciya» dlya mestnyh byudzhetov // *Ekonomika i zhizn'*. [Moving money from budget to budget is an “injection” for local budgets // *Economy and life*], №16 (9632).
12. Doklad o sostoyanii mestnogo samoupravleniya v Rossijskoj Federacii: Izmenenie balansa interesov gosudarstvennoj vlasti i mestnogo samoupravleniya / Pod red. E. S. Shugrinoj. 2017. [Report on the state of local self-government in the Russian Federation: Changing the balance of interests of State power and local self-government / Edited by E. S. Shugrina]. M.: Izd-vo «Prospekt». 484 p.
13. *Shugrina E.S., Petuhov R.V.* 2017. Ob osobennostyah izmeneniya territorial'nyh osnov mestnogo samoupravleniya v Moskovskoj oblasti na primere Shahovskogo rajona // *Gosudarstvennaya vlast' i mestnoe samoupravlenie*. [About the peculiarities of changing the territorial foundations of local self-government in the Moscow region on the example of the Shakhovskiy district // *State power and local self-government*]. No. 2. P. 42-46.
14. *Petuhov R.V.* 2017. Territorial'naya organizaciya mestnogo samoupravleniya: poslednie zakonodatel'nye novacii // *Municipal'noe imushchestvo: ekonomika, pravo, upravlenie*. [Territorial organization of local self-government: recent legislative innovations // *Municipal property: economics, law, management*]. No. 3. P. 31-35.

Shvetsov A.N. Federal Research Center "Computer Science and Control" RAS, Moscow, Russia. Chief Researcher. Number of printed works: over 260. Research interests: system analysis and management in socio-economic systems.

Социально-философский анализ деятельности человека в окружающем мире

Ю.В. Пазюк^I, В.П. Ефимова^{II}, С.Н. Осипов^I

^I Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», г. Москва, Россия

^{II} НП ЭКЦ «МЭТ- Сертификация», г. Москва, Россия

Аннотация. В статье представлены результаты исследования жизнедеятельности человека с позиций междисциплинарного подхода. Известно, что в третьем тысячелетии реальный мир становится все более непредсказуемым, отражает нарастающую диалектическую противоречивость в развитии локальных цивилизаций в глобальном мире. Сегодня Россия входит в мировое сообщество как отдельная локальная цивилизация, отличающаяся своей уникальной структурой духовно-нравственного самобытного генотипа, уникальным культурным кодом, позволяющим эффективно противостоять внешним угрозам. Показано развитие человека как биологического и социального явления в историческом и социально-культурном аспектах от древнейших времен до наших дней. Делается вывод, что в условиях мировоззренческого противостояния между западным и незападным миром, российскому обществу необходимо принять только наиболее здоровые, естественно гармоничные элементы российского самосознания человека.

Ключевые слова: функционально-системный подход, устойчивое развитие, социальная система, жизнедеятельность человека, духовно-нравственные ценности, индивид.

DOI: 10.14357/20790279230202

Введение

Человек, как биологическое существо, является высшей ступенью развития живых организмов на нашей планете, субъектом общественно-исторической и культурной деятельности, основным объектом и субъектом защиты своего физического, духовного и социального благополучия от внутренних и внешних негативных воздействий окружающей его среды.

Современный этап общественного развития России выдвигает на первый план идею эффективности человеческого потенциала, связанного с активной ролью человека в жизни общества, государства, модернизации общественно-политического устройства, обеспечивающего его устойчивое и безопасное развитие.

Вместе с тем, устойчивое развитие человека как личности возможно лишь в условиях обеспечения его свободы без навязывания ему чуждых мнений. При этом человек остается свободен лишь в той мере, в какой условия его бытия позволяют обеспечить его безопасную жизнедеятельность, способ его осознанного существования, направленного на

нормальную повседневную деятельность и отдых. В процессе своей жизнедеятельности человек находится в постоянном контакте со своей средой обитания, определяющей качество его существования, а также условия работы в коллективе, поведения в социальной группе и обществе.

В рамках ранее проведенных исследований с позиции цивилизационного подхода показано, что Человек, как высшая ценность в Евразийской локальной цивилизации, являющейся преемницей исторически сложившейся православной (русской) цивилизации, опирается на духовно-нравственные и культурные ориентиры, национальные традиции и исторический опыт русского народа – государствообразующей нации в содружестве с другими нациями и народностями иных традиционных конфессий, проживающих на евразийском пространстве [1].

Евразийская локальная цивилизация, сложившаяся на евразийском пространстве, успешно может развиваться и эволюционировать в России только тогда, когда русский человек осознает свое место в обществе и несет ответственность за свои

действия, т.к. именно сознание и осознанность тесно связаны с его поведением в социальной среде, где он обитает. Причем в постнеоклассической науке все объекты развиваются на основе деятельностного отношения человека к миру. Это дает возможность в качестве основы современной научной картины мира принять единую концепцию универсального эволюционизма и разработать новые мировоззренческие ориентиры цивилизационного развития России¹.

Будущее России, ее национальное достояние видится авторам, в первую очередь, как гармоничное слияние передовых научно-технических, духовно-интеллектуальных сфер, как повышение качества жизни каждой отдельной личности, сохранение ценностей семьи, расширенное воспроизводство, повышение жизнестойкости государства и цивилизации в целом.

1. Человеческая сущность в философии

Философская мысль познания человека предполагает выявление в конкретно-исторической детерминации форм его активности, раскрытие различных исторически существовавших форм его бытия. С целью изучения философского круга проблем, связанных с человеком, авторами был проведен анализ данных об эволюции понятия человеческой сущности в философии, начиная с античной философии и до современного мира. Использовались источники как европейской, так и азиатской культуры, показан менталитет человека западного и человека восточного. Особенно это касается духовности человека и понятия «душа человека» [4, Приложение 1, с.700-721].

Античная философия охватывает период свыше тысячи лет – с конца III века до н.э. вплоть до VI века н.э. Человек здесь рассматривался преимущественно как микрокосмос, подчиненный в своих проявлениях высшему началу – Богу, судьбе, высшему Разуму. Именно Фалесу (ок. 625-547 гг. до н.э.), как основоположнику гилозоизма, принадлежит идея единства всего мироздания. Жизнь рассматривается философом как имманентное свойство материи, существующее само по себе, и движущееся, и одушевленное. При этом душа разлита во всем сущем, а Бог является универсальным интеллектом – Разумом мира.

И только у афинского Сократа (ок. 470-399 гг. до н.э.) основной философский интерес сосре-

дотачивается на вопросе о том, что такое человек, что такое человеческое сознание. «Познай самого себя» – Сократ обнаруживает как бы разные уровни, разные слои, состоящие с индивидом, носителем сознания, в весьма сложных отношениях, иногда даже вступающие с ним в противоречие. Высшая инстанция – Разум, способный дать не индивидуальное, а всеобщее мнение.

У Платона (427-347 гг. до н.э.) главной темой исследования остается изучение нравственно-этической сферы, а объектом – человек и его сущность. Платон выделяет в исследовании два направления – вечные и самосущные идеи с одной стороны, и преходящие, текущие и несамостоятельные вещи чувственного мира – с другой. В человеке он различает бессмертную душу и смертное, тленное тело. По Платону человеческая душа состоит из трех частей: разумной (обращенной к идеям), пылкой (аффективно-волевой) и чувственной (движимой страстями и вожделениями). Люди разделяются на три разных типа в зависимости от того, какая из частей души является преобладающей. При этом общей для всех сословий мерой выступает добродетель. «Ничего сверх меры» – таков принцип, общий как для Платона, так и для большинства греческих философов (Сократ, Аристотель, стоики, эпикурейцы).

Аристотель (393 – 384 гг. до н.э.) определял человека как *«общественное существо, наделенное разумом»*, предназначенное к жизни сообща. Он был сторонником среднего материального достатка, когда в обществе нет ни бедных, ни слишком богатых людей. Люди по природе не равны. Тот, кто не в состоянии сам ответить за свои поступки, не способен стать господином самого себя, не может воспитать в себе умеренность, самоограничение, справедливость и другие добродетели, являясь рабом по природе, может осуществлять лишь волю другого. Справедливость венчает все добродетели, к которым Аристотель относил также благоразумие, великодушие, самоограничение, храбрость, щедрость, правдивость, доброжелательность. Он полагал, что в человеке бессмертен только его разум: после смерти тела он сливается с вселенским разумом.

В философии эллинизма (IV век до н.э. – V век н.э.) меняется мировоззрение, ее интерес сосредотачивается на жизни отдельного человека. Эпикур (344 – 270 гг. до н.э.), пересматривая определение человека, данное Аристотелем, дает свою индивидуалистическую трактовку его сущности: *индивид – первичен*. Все общественные связи, все отношения людей зависят от отдельных лиц, от их субъективных желаний и рациональных

¹ Пазюк Ю.В., Ефимова В.П., Кубрина В.А. Закономерности развития локальных цивилизаций в третьем тысячелетии. Вопросы национальной безопасности России. М.: СвР – Аргус. 2016. С. 41-45.

соображений пользы и удовольствия. Высшим наслаждением Эпикур считал невозмутимость духа (атараксию), душевный покой и безмятежность, а такое состояние может быть достигнуто только при условии, что человек научится умерять свои страсти и плотские влечения, подчинять их разуму.

Школа неоплатонизма, получившая развитие в позднеантичную эпоху (III – IV вв.), развивала идею иерархии универсума, согласно которой весь мир представляется как иерархическая система, где каждая низшая ступень обязана своим существованием высшей. На верхнем уровне помещается единое (оно же Бог, оно же *благо*). Единое есть причина (прежде всего, целевая) всякого бытия. Вторая ступень – это ум, как таковой, и находящиеся в нем умопостигаемые сущности – идеи. Третья ступень – душа – источник всякого движения и, следовательно, всех волнений и страстей. Четвертая ступень – тело.

Философия средневековья. Проблема сущности человека и его бытия в мире получила развитие в работах христианского философа IV – V вв. Августина Блаженного (354 – 460 гг.). Характерные особенности этой проблематики проявились в происходившей на протяжении многих веков борьбе философских течений: *реализма, концептуализма и номинализма*.

Реалисты средних веков, Ансельм Кентерберийский (1033 – 1109 гг.) и концептуалисты (Абеляр (1079 – 1142 гг.) и др.), считали, что познание возможно лишь с помощью разума, ибо лишь «разум способен постигать общее».

Противоположное философское направление было связано с приоритетом «воли над разумом» и носило название *номинализма*. Здесь номиналисты опираются на учение Иоанна Дунса Скота (ок. 1266 – 1308 гг.), обосновавшего зависимость разума от воли и считавшего божественную волю причиной всякого бытия. Согласно учению номиналистов «человек есть живое существо, наделенное разумом».

Фома Аквинский (1225/1226 – 1274 гг.) рассматривает дух (ум), разумную душу как высшее из сотворенных сущих. Как и Аристотель, Фома Аквинский видит в воле практический разум, т.е. разум, направленный на действие. Фома Аквинский давал человеку двойственную оценку, характерную для всей последующей философской антропологии. Индивидуальность человека – это личное единство души и тела, именно душа обладает животворящей силой человеческого организма, но телесность также имеет сущностную значимость: именно через нее душа только и может образовывать то, что есть человек.

Арабская философия. Великий мыслитель Ибн-Сина/Авиценна (980 – 1037 гг.) также признает роль души. Он считал, что душа ведет человека к искусству, определяет его хорошие и дурные поступки, формирует потребности к познанию мира.

Философия эпохи возрождения. Впервые формируется понятие личности как нравственно-этической категории. Важнейшим критерием личности заявляется «способность индивидуума различать добро и зло» и поступать в соответствии с подобным различием. Вместе с этим появляется и второй важнейший признак личности – «способность нести ответственность за свои поступки» (Джованни Пико Делла Мирандола, М. Монтень, Николай Кузанский, Якоб Беме).

Западноевропейская философия XVII – XVIII вв. включает философию французского Просвещения и немецкую классическую философию. Проблема *разума и воли*, свободы воли наиболее полно раскрывается в работах Вольтера (Франсуа-Мари Аруэ), И. Канта, А. Шопенгауэра, С. Кьеркегора, Ф. Ницше.

И. Кант (1724 – 1804 гг.) называет *человеческую волю* автономной (самозаконной). Автономия воли состоит в том, что она определяется не внешними причинами, (будь то природная необходимость или даже божественная воля), а тем законом, который она сама ставит над собой, признавая его высшим, т.е. исключительно внутренним законом разума.

Отталкиваясь от кантовской идеи о примате практического разума и воли, А. Шопенгауэр (1788 – 1860 гг.) отстаивает примат *воли* по отношению к разуму, раскрывает специфику волевых (связанных с волей) и эмотивных (связанных с эмоциями) сторон человеческого духа. Воля была превращена А. Шопенгауэром в первоначало и абсолют – мир стал «*волей и представлением*».

Ф. Ницше (1844 – 1900 гг.) перевернул «ценностную шкалу» А. Шопенгауэра и, прежде всего, «нравственность», отвергая «христианскую мораль сострадания». Отсюда – романтика силы, утверждение индивидуализма, культ сверхчеловека. *Волю к власти* Ф. Ницше считал определяющим стимулом деятельности и главной способностью человека.

Л. Фейербах (1804 – 1872 гг.) подверг резкой критике религию и идеалистическое направление философии, дал свое материалистическое понимание человеческой сущности: «человек – не творение Бога, а часть – и притом наиболее совершенная, вечной природы». В этом утверждении раскрывается суть антропологизма Л. Фейербаха. Важнейшим для него является человек, как *психическое единство, единство души и тела*.

Философская антропология. Начало современной философской антропологии связано с работами Макса Шелера, Хельмута Плеснера, Арнольда Гелена и др., в центре внимания которых стоит проблема природы человека, специфическое отличие в способе существования его и животных.

В человеческой природе М. Шелер (1874 – 1928 гг.) выделяет два основных начала – **жизненное начало**, некий жизненный порыв, и **дух**, идущий от Бога. По своему жизненному началу **человек есть животное**, живое существо, но также и **существо разумное**, обладающее **духом**, поскольку Бог его им наделяет. М. Шелер усматривал сущность человека не в **мышлении или воображении**, а в любви. Сущность человека многогранна, утверждал М. Шелер, поэтому человека невозможно понять, т.к. он слишком широк.

Большинство представителей философской антропологии после М. Шелера стали рассматривать человека с точки зрения не его сущности, а с позиции его проявлений. Возникла функциональная или функционалистская школа философской антропологии, одним из основных представителей которой являлся Эрнст Кассирер (1874 – 1945 гг.). Он утверждал, что поскольку сущность человека непознаваема, то познать ее можно только через его проявление, через те функции, которые человек выполняет. Основное отличие человека от животного – это **деятельный труд**.

Отдельным направлением философской антропологии стало учение о человеке с точки зрения биологической, где сущность человека проявляется в его жизненном начале. Основным представителем биологического направления философской антропологии является немецкий философ Арнольд Гелен (1904 – 1976 гг.). Согласно А. Гелену, **человек – это животное, но животное особое в силу своего биологического и социального предназначения**.

Русская философия XIX – XX веков. Экзистенциальные и философско-антропологические идеи получили глубокое освещение в русской философии, прежде всего, у гениального психолога – писателя Ф.М. Достоевского (1821 – 1881 гг.), философов Л.И. Шестова (1866 – 1938 гг.) и Н.А. Бердяева (1874 – 1948 гг.).

Можно отметить главную идею русской философской антропологии – **«создание интегральной концепции человека, целостного учения о человеке путем использования и истолкования данных различных наук – психологии, биологии, социологии, а также религии»**. Следует вспомнить идеи М. Шелера, который считал, что незнание сущности человека приводит к кризису в культуре, отказу от

самого человека. **Кризис общества – это кризис человека, в первую очередь, кризис личности.**

По мнению авторов статьи, кризис современного общества показывает всю важность и насущность этой задачи. Проявления человеческой сущности крайне многообразны – это и разум, и воля, и характер, и эмоция, и труд, и общение. Человек думает, радуется, страдает, любит и ненавидит, постоянно к чему-то стремится, достигает желаемого и, не удовлетворяясь им, устремляется к новым целям и идеалам.

Еще Платон в своих диалогах говорит: человек – это **«двуногое животное без перьев»**. Человек действительно не имеет перьев и имеет две ноги. Но в этом шуточном определении упущено из виду основное – сущность человека. Как отметил Б. Паскаль (1623-1662 гг.), человек не теряет своей человеческой сущности, теряя две ноги, а петух не приобретает человеческих свойств, когда теряет перья. По словам Ф. Достоевского, «... самое лучшее определение человека – это существо на двух ногах и не благодарное».

Исторический опыт изучения человека показывает, что понятие «Человек» мы можем получить, только когда отвлекаемся от индивидуальных особенностей отдельных людей и оставляем то, что присуще для них всех. Систематизируя и анализируя концептуальные подходы, можно выделить четыре необходимые и достаточные **сущностные категории** человека, которые раскрывают феномен человека в его целостности и являются его имманентными свойствами: ум (интеллект), эмоция (чувство), воля (волевая регуляция), физика (тело).

Философские тенденции конца XX – начала XXI века характеризуются скептическим отношением к человеку как субъекту деятельности и познания философами постмодернизма. Жак Деррида (1930 – 2004 гг.) проповедует концепцию деконструктивизма, который представляет собой непрерывный и бесконечный процесс, исключающий подведение итога, обобщение смысла. Основной его девиз: «Мир есть текст».

Жан Франсуа Лиотар (1924-1998 гг.), представитель структурализма в философии постмодернизма, развивая постсовременную теорию справедливости, ввел понятие растущей «справедливости». По его мнению, главная обязанность философии заключается в сохранении мысли, мышлении.

Мишель Фуко (1926-1984 гг.), автор концепции европейской нации, культуры, считал, что ее основу составляет **«археология знания»**, а ее ядром являются проблематика «знания – язык», «знания – насилие», «знания – власть». В системе «знания

– власть» нет места для человека и гуманизма.

Метамодернизм. Начало XXI века характеризуется новым направлением в философии – метамодернизмом, заменяющим границы настоящего на пределы бесперспективного будущего и границы знакомых мест на пределы беспредельного. На самом деле, это и есть «судьба» человека метамодерна: *«преследовать бесконечно отступающие горизонты»*.

Голландский философ Робин ван ден Аккер, Тимотеус Вермюлен, британский художник Люк Тернер, современные отечественные исследователи метамодернизма Арт. Гусев, М. Серова и др. считают, что «метамодерн» – это новый способ смотреть на мир, который не дает готовую идею, а предлагает найти ее самостоятельно, используя *«осциллирующее движение»*. По их мнению, это и есть **принцип индивидуальности**, духовный аристократизм, творческая мораль как индивидуальное откровение.²

Большой интерес представляет статья М.В. Харкевича о специфике акторности современных государств различного типа: модерна, постмодерна и премодерна, особенности их участия и поведения в глобальной экономике. «При управлении различными политико-экономическими и социальными процессами государства модерна склонны использовать формы прямого воздействия. Государства постмодерна, напротив, предпочитают оказывать влияние посредством институтов и формирования соответствующего политического и правового контекста. Государства постмодерна более органично встроены в систему неолиберальной мировой политической экономии, чем государства модерна [5].

Растущая разобщенность в обществе становится сегодня все большим тормозом на пути формирования целостного научного мировоззрения и развития единой человеческой культуры.

Несомненно, человеческое мышление является собой сложноорганизованный био-психо-социальный феномен, конкретная наполненность которого – переплетение физического, психического и социального, причем такое, где социальное, предопределенное эмоционально-интеллектуально-волевой сферой, выступает как психическое.

Ниже приведены измерение и анализ теории развития человека с позиции социальной философии в рамках различных теорий эволюции современного общества и человека как личности.

2. Социология человека

Многообразие современных парадигм соци-

ального учения о человеке обусловлено углубляющейся пропастью между реальной человеческой деятельностью и научным знанием с позиции человеческой духовности, нравственности. Совокупность человеческих взаимоотношений, регулируемых определенными этическими нормами и правилами, составляют современное общество, пронизанное рациональностью и рационализацией, «формой» в противовес «содержанию», сложными безличностными отношениями, которые сменили традиционные межличностные отношения с их общиноподобной эмоционально окрашенной мотивацией [2, с. 55].

Вариативность поведения человека, включение его в социальную среду, раскрывает его сущностное поведение в обществе в соответствии со своими ценностными ориентациями, мировоззренческими установками в соответствии с собственным выбором.

Общечеловеческие ценности являются изначально релятивистским понятием, двойственность которых заложена как в неоднозначности понятия «ценность», так и противоречивости понятия «общечеловеческой», что особенно заметно при попытке исследования духовных ценностей. Система общечеловеческих ценностей, порожденных индивидуалистическим западным обществом, по своей сути может привести к доминированию только материальных ценностей, присущих обществу потребления.

В рамках Богословских чтений Патриархом Алексием II в 1994 г. впервые были сформулированы проблемы духовной сущности человека, **необходимости духовного возрождения России**. Это связано с повышением самосознания русского народа, с лучшим пониманием таких нравственных ценностей, как *порядочность, навыки сопереживания, умения отличать добро от зла, совести, чести, сострадания, человеколюбия, осуждения жестокости, насилия, стяжательства*.

Общая схема основных составляющих традиционных (консервативных) ценностей культуры, духовно-нравственных ориентиров приведена на рис. 1. Авторы отмечают, что в условиях глобализации базовые ценности народов западных стран и Евразийской локальной цивилизации несколько различаются.

Испокон веков русскому народу были присущи духовность, культура, мораль, этика, просвещенность, мировоззрение, менталитет, идентичность [4, с.452].

Наиболее характерными западными ценностями являются: индивидуализм, человеческое достоинство, свобода, демократия, равенство, верховенство закона и уважение прав человека, ген-

² <https://newtonew.com/culture/wow-metamodern>

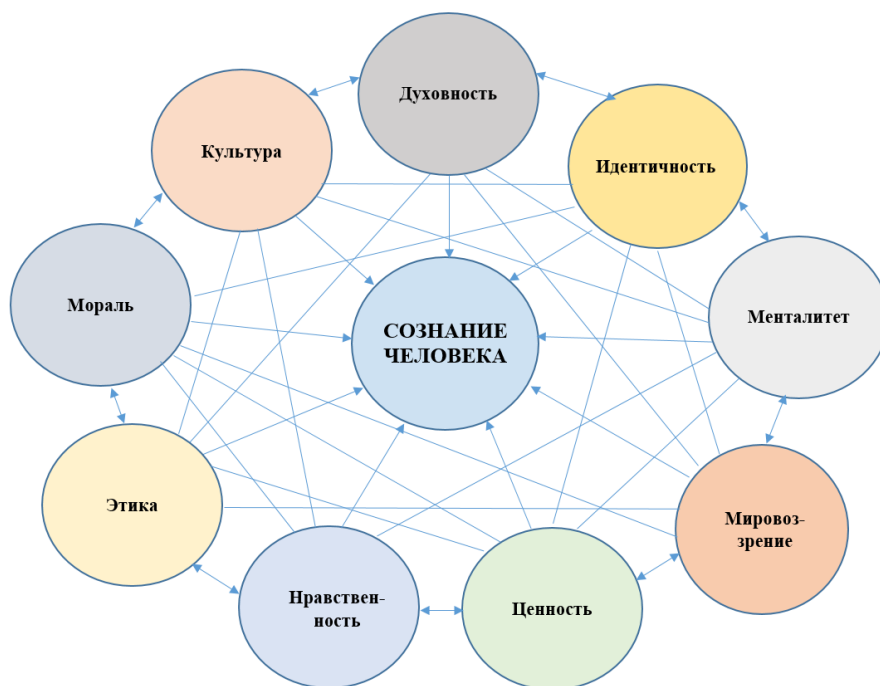


Рис. 1. Мировоззренческие, культурные, духовно-нравственные ценностные ориентиры, влияющие на сознание человека

дерное право, включая права лиц, принадлежащих к меньшинствам, мультикультурализм.

По мнению Ю.В. Попкова, базовые ценности народов Евразийской локальной цивилизации значительно отличаются от ценностей западного образца, а именно: традиционных ценностей коллективизма и коллективной собственности, общего порядка и стабильности, приоритета общественных интересов и ориентации на сотрудничество, что составляет устойчивую основу евразийской цивилизационной общности народов, сложившейся в результате многовековых связей и совместной жизнедеятельности. Сходство базовых ценностей составляют основу евразийской цивилизационной общности [6].

Следует отметить, финансовый и экономический кризисы XXI века, пандемия и, как следствие, глобальный цивилизационный кризис привели к глобальным социальным потрясениям и опасностям, способным погубить мировое сообщество или отдельные страны. Исторически сложившиеся различия между странами: социально-политическое устройство, уровень и темпы развития, социальное неравенство, национальные и расовые потрясения населения, геоклиматические катаклизмы и техногенные катастрофы, могут служить поводом для локальных войн, международного терроризма, межэтнических экстремистских конфликтов.

Человек и окружающая его среда всегда едины. Общество и Человек эволюционируют в неразрывной взаимосвязи: общество формирует запрос к новому качеству человека, а человек, адаптируясь к новым условиям среды, изменяется сам и целенаправленно изменяет весь окружающий мир.

Человек рассматривается как общеродовое социальное понятие с совокупностью физиологических и психологических особенностей, отличающих человеческое существо от других живых существ. В этих условиях конкретным представителем человеческого рода является индивид. Это конкретный человек, представитель и носитель человеческого рода, член социальной общности, демографическая единица.

Личность человека в этом случае является его социальной сущностью, совокупностью социальных характеристик, которые появляются в ходе своего социального опыта. Она формируется и развивается в процессе жизнедеятельности человека, т.е. приобретения им определенного социального опыта. На базе знаний и логических способностей формируется интеллект, осознанность своего отношения к миру и себе. В развитии личности человека проявляются ее качества, как позитивные (*гуманизм, воля, честь, совесть, убеждения, патриотизм, скромность, справедливость, верность* и пр.), так и негативные (*стяжательство, цинизм, трусость, чванливость, нигилизм* и т.д.).

Основной характеристикой личности человека является ее автономность, самостоятельность в принятии решений и ответственность за их исполнение. Только человеку присуще уникальное качество – взаимодействие различных людей через социальность, т.е. коллективное взаимодействие, благодаря которому они включаются в особый мир, выделенный из природы и отличающийся от природы качественными свойствами его внутренней и внешней свободы [7].

Свобода человека является исторической способностью человека к активной деятельности в соответствии со своими намерениями и желаниями, интересами, в ходе которой он добивается поставленных перед собой целей. Необходимо особо подчеркнуть, что человек ограничен в проявлениях свободы в рамках закона, морали, собственной совести, отношением к природе, обществу, культуре и пр. Свобода, являясь онтологической первоосновой человека, как личности, представляет исторический, социальный и нравственный императив, ее индивидуальность и уровень развития общества.

Ответственность личности представляется социальным регулятором, который не позволяет человеку направить свои действия в ущерб социуму. Истинная свобода предполагает способность выбора между добром и злом в пользу первого. Человек, предоставленный самому себе, может быть просто опасен и, зачастую, вовсе не является хозяином собственной судьбы. Поэтому еще В. Соловьев (1853-1900 гг.) не без оснований предостерегал: «Предоставленный самому себе человек не может уберечь ни своей жизни, ни своего нравственного достоинства. Он не в силах избавить себя ни от телесной, ни от духовной смерти» [8]. Свобода потому и является свободой, что предоставляет возможность выбора из множества альтернатив, включая выбор между добром и злом.

Только человек, как социальная личность, есть творец своих собственных общественных отношений, носящих объективный характер, сознательно совершая те или иные действия, устанавливая определенные цели для решения своих общественных отношений.

Социальная общность – это целостное социальное образование людей, которое характеризуется устойчивыми связями, единым образом жизни общества в условиях неопределенности внешней среды.

Только общие социальные потребности, связанные с профессиональными способностями людей, приобретением социального статуса и реализацией потребности в общении, стимулируют человеческую деятельность и, соответственно, направляют развитие человека в целом.

Преимущество интегрированных знаний естественного и гуманитарного профилей позволило авторам выполнить главную исследовательскую функцию – представить человека как гармоничную и, вместе с тем, противоречивую целостность космического, биологического, социокультурного и психологического начала его бытия [4].

3. Психология человека

Как было уже ранее сказано, на выстраивание и развитие личностных качеств человека влияют следующие основополагающие факторы:

- биологический, формирующий привычки человека (пристрастие к определенным видам еды, музыке, искусству и пр.);
- социальный, формирующий в человеке его роль в общественных отношениях, отношение к другим социальным группам, а также к себе;
- психический, синтезирующий полученную извне информацию и либо ее принимающий, либо отвергающий [9].

Практической психологией накоплен обширный опыт использования различных тестов, применяемых в диагностике психических состояний и свойств личности, межличностных отношений, в психодиагностике профессионального подбора кадров. Проблема формирования и развития личностного капитала человека (руководителей высшего звена, ведущих специалистов и др.) сегодня весьма актуальна для России, т.к. существующие методики оценивают человека преимущественно в аспекте отдельных и часто взаимозависимых личностных свойств, не учитывают базовую структуру личности, определяющую природу человека, наличие врожденных способностей быть лидером, руководителем, создавать инновации.

Проведенные исследования позволили авторам разработать типологию индивидуальных личностных свойств человека по группам возможностей социальной адаптации человека в обществе³.

Движущей силой человеческой деятельности, как известно, является удовлетворение определенных жизненных потребностей. Структура человеческих потребностей – явление чрезвычайно сложное, включающее в себя потребность в материальных благах, общении, семейной жизни, воспитании детей, познании, наслаждении

³ Пазюк Ю.В., Ефимова В.П. Кубрина В.А., Арестов А.С. Проект методики предварительного психологического ранжирования личностных свойств индивида для целенаправленной деятельности в различных социальных институтах верхних страт общества.

прекрасным, в самовыражении и т.д. Вместе с тем, сама система потребностей человека никогда не была чем-то застывшим и неизменным, т.к. зависит от социальной среды, статуса в обществе, личного роста и других факторов. Управлять поведением людей можно только на основе знания базовой структуры потребностей и понимания закономерностей ее формирования. По мнению авторов, основные проблемы анализа потребностей состоят в установлении их состава, иерархии, границ, уровней и возможностей их удовлетворения. При этом все возникающие проблемы тесно взаимосвязаны. Для понимания сущности психологии личности особый интерес представляет иерархическая классификация основных потребностей людей, разработанная А. Маслоу (1908-1970 гг.) в рамках его теории человеческой мотивации⁴ психологически здоровых людей [11].

Предложенная А. Маслоу классификация «самоактуализированной личности» позволила сформулировать позитивный, гуманистический взгляд на человеческую природу. По мнению А. Маслоу к числу таких самоактуализированных людей относились Авраам Линкольн, Томас Джефферсон, Альберт Эйнштейн, Элеонора Рузвельт, Джейн Адамс, Уильям Джеймс, Альберт Швейцер, Олдос Хаксли и Барух Спиноза. Как отмечал ученый, самоактуализирующиеся люди «все без исключения, вовлечены в какое-то дело, во что-то находящееся вне их самих. Они преданы делу, которое является чем-то очень ценным для них — это своего рода призвание, в старом, проповедническом смысле слова. Такие люди занимаются чем-то, что предназначено им судьбой. Одни посвящают свою жизнь закону, другие — справедливости, еще кто-то — красоте или истине.

Все они тем или иным образом посвящают свою жизнь поиску предельных «бытийных» морально-нравственных и этических ценностей, которые являются подлинными и не могут быть сведены к чему-то более высокому.

Как утверждал ученый, имеется около четырнадцати таких «бытийных» ценностей: истина, добро, красота, цельность и единство противоположностей, жизненность, уникальность, совершенство и необходимость, завершенность, справедливость и порядок, простота, богатство (все целиком, ничего недостающего или скрытого), непринужденность, игра, «самодостаточность» [16]. Все они выступают как потребно-

сти. А. Маслоу назвал их «мета-потребностями». Их подавление, по мнению ученого, порождает определенный тип патологий, до сих пор недостаточно хорошо описанных, которым он дал название «метопатологий». Метопатологии, по его мнению, — это «заболевания души», которые происходят, например, от постоянного проживания среди лжецов и потери доверия к людям. В некотором, вполне определенном эмпирическом смысле, человеку необходимо жить в красоте, а не в уродстве, точно так же как ему необходима пища для голодного желудка или отдых для усталого тела // Самоактуализация (Maslow A. Self-actualizing and Beyond).

«Я осмелюсь утверждать», пишет А. Маслоу, «что на самом деле эти бытийные ценности являются смыслом жизни для большинства людей, хотя многие даже не подозревают, что они имеют эти метапотребности».

Акмеологический⁵ подход А. Маслоу раскрывает потребности личности в росте и самореализации, позволяет потребности достичь «акме» (профессиональной, личностной, духовной, творческой) профессионализма и компетентности. В развитии теории А. Маслоу теоретическая модель психологии элит, предложенная Н.Б. Карабущенко [17], и в частности, ее содержательно-критериальные составляющие, позволяют следующим образом раскрыть сущность «акме»:

- высокий уровень притязаний личности, мотивация самореализации и наивысший уровень активности человека, способствующие наибольшей продуктивности его профессиональной деятельности (**потребностно-мотивационная зрелость**);
- стремление человека к вершинам его личностного и профессионального развития, сопряженного с постоянными процессами интеграции индивидуальности с условиями среды, способствующими формированию ее индивидуального стиля (деятельности, жизнедеятельности и др.) — **социально-психологическая зрелость**;
- реализация личностного потенциала за счет пополнения знаний, расширения кругозора, совершенствования умений — **интеллектуально-креативная зрелость**;
- осознанная саморегуляция личности, включающая степень волевого усилия для достижения цели — **эмоционально-волевая зрелость**.

⁴ Авторами под человеческой мотивацией понимается процесс побуждения себя и других лиц к деятельности для удовлетворения своих потребностей и достижения своих жизненных целей.

⁵ Акмеология (от др.-греч. ακμή, акме — вершина, др.-греч. λόγος, logos — учение) — философский раздел психологии развития, исследующий закономерности и механизмы, обеспечивающие возможность достижения высшей ступени (акме) индивидуального развития.

Подводя итог проведенных Н.Б. Карабущенко исследований можно сказать, что именно *потребности личности в самореализации и самосовершенствовании* способствуют Акме-реализации. Они, также как и *потребности в самоактуализации* относятся к высшим (когнитивным) потребностям в процессе деятельности человека.

На основании проведенных исследований в табл. 1 приведено сравнение потребностей самореализации, самосовершенствования и самоактуализации.

Таким образом, рассматривая жизнедеятельность человека, следует обратить особое внимание на ответственность и причастность представителей

Табл. 1

Иерархия потребностей личности в самореализации, самосовершенствовании и самоактуализации

Высшие (когнитивные) потребности	Потребности самоактуализации ⁶	Мета-реализация (микрокосм⁷) Мета-элита⁸ (Самоактуализирующиеся люди) Неотъемлемые качества личности – <i>широта взглядов, величие духа, нетривиальность, бескорыстие, отсутствие мелочности, зависти, демонстративности, желания манипулировать людьми.</i> «Они прислушиваются к своему собственному голосу, они берут на себя ответственность, они честны, они много работают»⁹ Мета-потребности (Служение, центрирование на проблеме больше, чем на собственном ЭГО) Эстетические (бытийные) ценности (Истина, красота, добро, совершенство, гармония, порядок и др.)
	Потребности самореализации и самосовершенствования	Акме-реализация (Я-концепция) Элита общества (культурно-творческая, политико-административная, бизнес-элита, интеллектуальная элита общества) Потребности самосовершенствования познавательные потребности- знать, уметь, понимать, исследовать. Потребности самореализации: компетентность, достижение успеха, уважение (почитание), одобрение, признание; любовь, принадлежность к общности.
Низшие потребности (органические, психологические) потребности	Потребности выживания	Потребности в безопасности (чувство защищенности, избавление от страха и неудач) Базовые физиологические потребности (голод, жажда, половое влечение, дыхание, сон и другие)

⁶ Потребность в «самоактуализации» – «понимаемой как непрерывная реализация потенциальных возможностей, способностей и талантов, как свершение своей миссии, или призвания, судьбы и т.п., как более полное познание и, стало быть, принятие своей собственной изначальной природы, как неустанное стремление к единству, интеграции, или внутренней синергии личности» (А. Маслоу. Психология бытия., с 49.)

⁷ **Микрокосм** (греч., от mikros – маленький, и kosmos – мир). Мир в малом виде. У древних философов, человек, отражающий в себе все чудесное мира, находясь с ним в ближайшей гармонии. (Источник: «Словарь иностранных слов, вошедших в состав русского языка». Чудинов А.Н., 1910)

⁸ **Мета-элита** (в авторской редакции) – это совокупность самоактуализирующихся личностей, составляющих ядро отдельных элит: культурной (культурно-творческой, духовно-интеллектуальной), позиционной (политико-административной), экономической (бизнес-элиты), интеллектуальной (научной, технико-технологической, информационной и пр.), как главных субъектов действия социальных систем общества: системы культуры, социально-политической системы, экономической системы, и технологической системы, соответственно.(авт.)

⁹ Самоактуализация. Maslow A. Self-actualizing and Beyond.-In:Challenges of Humanistic Psychology. N.Y. 1967, с.6

различного типа национальных элит ко всему происходящему в обществе [17]. Современная политическая элита должна выполнять ряд специальных функций, базовыми из которых являются: функция закрепления и воспроизводства общественно-политических отношений, регулятивная, транслирующая, коммуникативная. Ключевая функция в этом случае – «снижение неопределенности в обществе, его стабилизация и интеграция»¹⁰.

Ю.И. Дроздов, С.И. Илларионов выделяют следующий ряд качеств человека, которые, в первую очередь, должны быть присущи субъекту политической элиты (идеальная модель):

- служение высшим интересам общества; патриотическое служение обществу (проявление гражданственности, верности обществу);
- соблюдение требований нравственности, демонстрация человеческого достоинства, суверенности личности; высокий интеллектуальный уровень. Следуя теоретической модели, «к элите принадлежит не тот, кто имеет власть и деньги, а тот, кто характеризуется определенным набором гражданских и нравственных качеств, позволяющих быть обладателями всего лучшего, что накопило человечество» [18].

По мнению В.В. Путилина, сейчас большинство госслужащих ориентировано на исполнительскую модель профессионализма, основанную на стандартном знании и опыте исполнения определенного набора должностных обязанностей [19].

Президент России В.В. Путин в интервью американскому телеканалу NBC News¹¹ высказался, что его уход с поста главы государства ничего не должен разрушить. О своем будущем преемнике он заявил «Если я увижу, что это человек с конструктивными взглядами, человек предан стране, готов положить на алтарь Отечества не просто годы, а всю свою жизнь, как бы он ни относился ко мне лично, я сделаю все, чтобы такие люди были поддержаны».

По мнению авторов, основной фигурой в XXI веке должен стать человек – социально-активная личность, с яркой индивидуальностью, компетентностью и свободой в принятии своих решений.

Заключение

В условиях мировоззренческого противостояния между западным и незападным миром, российскому обществу необходимо принять толь-

ко наиболее здоровые, естественно гармоничные элементы российского самосознания человека, его достоинство, включающее *творческий предпринимательский дух, здоровую и добросовестную конкуренцию, бережное отношение к своему слову перед партнером, общинную компоненту организации труда и социальной защиты, просветительский вектор общественного развития, заложенного генетически в российском менталитете*, а не те западные ценности, которые навязываются в условиях непрекращающихся санкций и угроз со стороны США и ее союзников.

Авторы полагают, что именно самоактуализирующиеся люди, в перспективе должны представлять новую политическую «элиту» в новом российском обществе, а другими словами, Мета-элиту как авангард Евразийской модели безопасного цивилизационного развития России.

Литература

1. Митрополит Новосибирский и Бердский Тихон. Цивилизационный выбор России. // Образование и Православие. Вестник Новосибирской Митрополии. № 12 (132), декабрь 2014.
2. Пазюк Ю.В., Ефимова В.П. Стратегическое управление: личностный капитал человека как основа Евразийской модели цивилизационного развития России в третьем тысячелетии. Вопросы национальной безопасности России. М.: СвР-Аргус. 2015.
3. Пазюк Ю.В. Концептуальные основы цивилизационной безопасности в третьем тысячелетии. М.: ПолиПринтСервис. 2019.
4. Пазюк Ю.В., Ефимова В.П. Стратегическое управление: Безопасность развития России как государства-лидера Евразийской локальной цивилизации в третьем тысячелетии. Вопросы национальной безопасности. 2021. Изд. Технологии. М. Т. 8.
5. Харкевич М.В. Государство в современной мировой политике. // Вестник МГИМО Университета. 2010. №6 (15). С. 160-166.
6. Попков Ю.В. Базовые ценности народов Евразийской локальной цивилизации в условиях глобализации. // Электронный информационный журнал Новые исследования Тувы: www.tuva.asia. 2009, №1-2. С. 51-64.
7. Никоноров С.П. Социальные формы постижения бытия. // Проблемы и решения. 1995. № 2. С. 3-10.
8. Соловьев В.С. Соч.: в 2-х т. Т. 2. М. 1988.
9. Юнг К.Г. Психологические типы/К.Г. Юнг, М.: Издательская фирма «Прогресс-Универс». 1995. 716 с.

¹⁰ Прокофьева Ю.В. Институционализация политической элиты в современной России (региональный аспект): дис. канд. социол. Наук: 22.00.04. Саратов, 2004, с 108.

¹¹ Путин о будущем преемнике: сделаю все для поддержки преданных стране людей – Новости – Политика – Коммерсантъ (kommersant.ru)

10. Холл К., Линдсей Г. Теория личности. PSYLIB. 2000. С. 167-194.
11. Афанасьев А. Синтаксис любви. М.: «Остожье». 2000. С. 21.
12. Пазюк Ю.В., Ефимова В.П., Кубрина В.А. Типологическая система ранжирования личностных свойств индивидуума на основе трехуровневого моделирования. Патент на полезную модель №117669 от 27.06.2012.
13. Пазюк Ю.В., Ефимова В.П., Кубрина В.А. Способ иерархической функционально-системной психофизической оценки индивидуально-типологических особенностей целенаправленной деятельности человека. Патент на изобретение №2506046 от 10.02.2014.
14. Социальная аналитика. Анализ элементов взаимодействия//Сорокин П. Система социологии. В2-х т. М.: Наука. 1993. С. 52-58.
15. Маслоу А. Мотивация и личность. 3-е изд. СПб. ПИТЕР. 2012. С. 46-58.
16. Маслоу А. Новые рубежи человеческой природы/Пер. с англ. 2-е изд. М.: Смысл: Альпина нон-фикшн, 2011. С. 153-154.
17. Карабущенко Н.Б. Психология российских элит: теоретико-обобщенная и реальные модели: Монография. М: Изд-во МНЭПУ. 2009. 170 с.
18. Дроздов Ю.И., Илларионов С.И. Политическая элита России. М.:РИЦ «ПрофЭко». 2007. 575 с.
19. Путилин В.В. Политическая компетентность административно-политических элит: критерии, уровни, технологии реализации// Элитологические исследования. Ежегодник – 2005. Сб. статей/ Отв. Ред.А.В. Понеделков, А.М.Старостин. Ростов н/Д:Изд-во СКАГС. 2006. с. 271-281.

Пазюк Юрий Васильевич. Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, г. Москва, Россия. Ведущий научный сотрудник. Доктор технических наук, профессор. Количество печатных работ: 60 (в т.ч. 7 монографий, 7 учебников, 10 методик, 12 патентов). Область научных интересов: стратегическое управление развитием социально-экономических систем (цивилизационный подход), социология, политология, теория цивилизаций, национальная цивилизационная безопасность России. E-mail: rasmets@yandex.ru

Ефимова Вера Петровна. НП ЭКЦ «МЭТ-Сертификация», г. Москва, Россия. Начальник аналитического отдела. Кандидат технических наук. Количество печатных работ: 20 (в т.ч. 7 монографий, 2 учебника, 6 методик, 5 патентов). Область научных интересов: социология, теория цивилизаций, теория базальных личностных конструкторов. E-mail: rasmets@yandex.ru

Осипов Сергей Николаевич. Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, г. Москва, Россия. Ведущий научный сотрудник. Кандидат физико-математических наук. Количество печатных работ: более 50 (в т.ч. 16 патентов). Область научных интересов: математическое моделирование социально-экономических процессов. E-Mail: osipov@isa.ru

Socio-philosophical analysis of human activity in the surrounding world

Yu.V. Pazyuk^I, V. P. Efimova^{II}, S.N Osipov^I^I Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia^{II} NP EKC "MET – Certification», Moscow, Russia

Abstract. The results of the study of human life activity from the perspective of an interdisciplinary approach are presented in the article. In the third millennium, the real world is becoming increasingly unpredictable, reflects the growing dialectical inconsistency in the development of local civilizations in the entire world community. Nowadays Russia enters this community as a separate local civilization, distinguished from the others by its unique structure of spiritual and moral original genotype, its unique cultural code, which makes it possible to resist external threats effectively. The authors show the development of a man as a biological and social phenomenon in historical and socio-cultural aspects, from the ancient times to the present day. The conclusion is made that in terms of philosophic confrontation between Western and non-Western world Russian society should take just the most healthy, naturally harmonized element of Russian self-consciousness.

Keywords: *functional-system approach, sustainable development, social system, human activity, spiritual and moral values, individual*

DOI: 10.14357/20790279230202

References

1. Mitropolit Novosibirskij i Berdskij Tihon. Civilizacionnyj vybor Rossii. // Obrazovanie i Pravoslavie. Vestnik Novosibirskoj Mitropolii. № 12 (132). dekabr' 2014.
2. Pazyuk YU.V., Efimova V.P. Strategicheskoe upravlenie: lichnostnyj kapital cheloveka kak osnova Evrazijskoj modeli civilizacionnogo razvitiya Rossii v tret'em tysyacheletii. Voprosy nacional'noj bezopasnosti Rossii. M.: SvR-Ar-gus. 2015.
3. Pazyuk YU.V. Konceptual'nye osnovy civilizacionnoj bezopasnosti v tret'em tysyacheletii. M.: PoliPrintServis. 2019.
4. Pazyuk YU.V., Efimova V.P. Strategicheskoe upravlenie: Bezopasnost' razvitiya Rossii kak gosudarstva-lidera Evrazijskoj lokal'noj civilizacii v tret'em tysyacheletii. Voprosy nacional'noj bezopasnosti. M.: T. 8, Izd. Tekhnologii. 2021.
5. Harkevich M.V. Gosudarstvo v sovremennoj mirovoj politike. // Vestnik MGIMO Universiteta, №6 (15). 2010. P. 160-166.
6. Popkov YU.V. Bazovye cennosti narodov Evrazijskoj lokal'noj civilizacii v usloviyah globalizacii. // Elektronnyj informacionnyj zhurnal Novye issledovaniya Tuvy: www.tuva.asia. 2009. №№1-2. P. 51-64.
7. Nikonorov S.P. Social'nye formy postizheniya bytiya. // Problemy i resheniya. № 2. 1995, s. 3-10.
8. Solov'ev V.S. Soch.: v 2-h t., T. 2.: M. 1988.
9. YUng K.G. Psihologicheskie tipy/K.G. YUng, M.: Izdatel'skaya firma «Progress-Univers». 1995. 716 p.
10. Holl K., Lindsej G. Teoriya lichnosti. PSYLIB. 2000. P. 167-194
11. Afanas'ev A. Sintaksis lyubvi. – M.: «Ostozh'e», 2000. P. 21
12. Pazyuk YU.V., Efimova V.P., Kubrina V.A. Tipologicheskaya sistema ranzhirovaniya lichnostnyh svojstv individuum na osnove trekhurovnevo-go modelirovaniya. Patent na poleznuyu model' №117669 ot 27.06.2012.
13. Pazyuk YU.V., Efimova V.P., Kubrina V.A. Sposob ierarhicheskoy funkcional'no-sistemnoj psihofizicheskoy ocenki individual'no-tipologicheskikh osobennostej celenapravlennoj deyatel'nosti cheloveka. Patent na izobretenie №2506046 ot 10.02.2014.
14. Social'naya analitika. Analiz elementov vzaimodejstviya // Sorokin P. Sistema sociologii. V2-h t. M.: Nauka. 1993. P.52-58.
15. Maslou A. Motivaciya i lichnost'. 3-e izd. SPB. PITER. 2012. P. 46 -58.
16. Maslou A. Novye rubezhi chelovecheskoj prirody/Per. s angl-2=e izd. – M.: Smysl: Al'pina non-fikshn. 2011. P. 153-154.
17. Karabushchenko N.B. Psihologiya rossijskih elit: teoretiko-obobshchennaya i real'nye modeli: Monografiya. M: Izd-vo MNEPU. 2009. 170 p.
18. Drozdov YU.I., Illarionov S.I. Politicheskaya elita Rossii. M.: RIC «ProfEko». 2007. 575 p.
19. Putilin V.V. Politicheskaya kompetentnost' administrativno-politicheskikh elit: kriterii, urovni, tekhnologii realizacii // Elitologicheskie issledovaniya. Ezhegodnik – 2005. Sb. statej/ Otv. Red. A.V. Ponedelkov, A.M. Starostin. Rostov n/D: Izd-vo SKAGS. 2006. P. 271-281.

Pazyuk Yu.V. Doctor of technical Sciences, Professor, leading researcher of the Federal Research Center «Computer Science and Control» of the Russian Academy of Sciences. The total experience of scientific and pedagogical activity is 40 years. Research interests: strategic management of development of socio-economic systems (civilizational approach), sociology, political science, theory of civilizations, civilizational security of Russia. Author of a number of monographs, methods and patents, Laureate of the Russian Government Prize in science and technology. E-mail: rasmets@yandex.ru

Efimova V.P. Candidate of technical Sciences, head of analytical Department of NPEKC “MET – Certification”. The total experience of research activities – 40 years. Research interests: sociology, theory of civilizations, theory of basal personal constructs. The author of methodology of research of personal capital of the person, a technique of psycho-diagnostic assessment of personal properties of the person, methods of cost estimation of the total human capital. Author of a number of patents for invention, monographs and publications. E-mail: rasmets@yandex.ru

Osipov S.N. Leading researcher of Federal Research Center ‘Computer Science and Control’ of the Russian Academy of Sciences. PhD in Physics and Mathematics-Sciences, senior researcher. Number of printed works: more than 50. Research interests: modeling and forecasting of developing systems. E-mail: isa@isa.ru

Прогнозирование развития экономики российских регионов с учетом нового классификатора видов экономической деятельности

Д.М. Галин, И.В. Сумарокова

Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», г. Москва, Россия

Аннотация. В статье рассматриваются построенные авторами макромоделли двух федеральных округов России, соответствующие новому классификатору видов экономической деятельности. Представлены результаты прогнозирования развития экономики этих регионов с использованием макромоделей на период до 2028 г. по двум сценариям.

Ключевые слова: прогнозирование развития экономики, макромодель, модели переменных, эндогенные и экзогенные переменные, сценарий, решение задачи прогнозирования, классификатор видов экономической деятельности, точность прогноза показателя, динамика показателя.

DOI: 10.14357/20790279230203

Введение

В нестабильных экономических условиях современной России актуальна разработка методов прогнозирования развития экономики страны и ее регионов (федеральных округов и субъектов федерации) на различные периоды с использованием макроэкономических моделей, в которых достаточно полно учитываются взаимозависимости экономических показателей. Вместо термина «макроэкономическая модель» авторами употребляется сокращение «макромодель». Основное направление исследований авторов – разработка макромоделей различных объектов (страны и регионов) и их использование для прогнозирования развития их экономики.

Тематика настоящей статьи близка к тематике статей [1–3]. В [1] исследуется модель экономического роста, учитывающая миграционные потоки в составе трудового ресурса экономики, в основе которой лежит производственная функция Кобба-Дугласа, одним из факторов которой является совокупный труд. В [2] анализируется взаимосвязь политики макроэкономической стабилизации и развития российской экономики на отраслевом и региональном уровнях и констатируется, что в условиях структурной и региональной несбалансированности такая стабилизация не обеспечивает перехода к устойчивому экономическому росту. В [3] представлены результаты построения системы

макроэкономических балансов для Краснодарского края, Ставропольского края и Кабардино-Балкарской Республики как основы для разработки методов прогнозных расчетов экономики этих регионов и определения мер, необходимых для стабилизации экономического положения и создания условий для перехода к экономическому росту.

В настоящей статье предполагается, что динамика любой переменной описывается ее моделью. Каждая из них состоит из одного уравнения, выражающего зависимость переменной (фактора-функции), которая может быть представлена в натуральной или в логарифмической форме, от факторов-аргументов и времени или только от времени. Для времени используется обычное обозначение t ; на условной шкале времени значение $t=0$ соответствует 2000 г.

В уравнении модели зависимости переменной (фактора-функции) $Z(t)$ от факторов-аргументов $x_j(t)$ и времени каждый аргумент может быть представлен, как и функция, либо в натуральной, либо в логарифмической форме. Такое уравнение имеет общий вид:

$$F_Z(Z(t)) = b_1 + \sum_{x_j \in X_Z} b_{x_j} F_{x_j}(x_j(t)) + b_t t. \quad (1)$$

Здесь $F_Z(Z(t))$ – значение $Z(t)$ в его форме представления, то есть, либо $F_Z(Z(t))=Z(t)$, либо

$F_Z(Z(t)) = \ln Z(t)$, $F_{x_j}(x_j(t))$ – аналогичная величина для $x_j(t)$, X_Z – множество факторов-аргументов уравнения. Обозначение b_1 используется для свободного члена уравнения, так как его можно рассматривать как коэффициент при переменной, тождественно равной единице и далее именуемой «единица». Слагаемое $b_1 t$ может отсутствовать.

Уравнение модели зависимости переменной (фактора-функции) $Z(t)$ от времени, а точнее, от функций времени $g_j(t)$ из заданного множества G , имеет общий вид:

$$F_Z(Z(t)) = d_1 + \sum_{g_j \in G_Z} d_{g_j} g_j(t). \quad (2)$$

Здесь $F_Z(Z(t))$ означает то же, что и в уравнении (1), G_Z – множество используемых функций, $G_Z \subset G$. Состав постоянно используемого авторами множества G приведен в [4].

Далее выражение вида «задача прогнозирования развития экономики некоторого объекта с применением его макромоделей» заменяется сокращением вида «задача прогнозирования для данного объекта». Ее постановка в общем виде представлена в [4]. В настоящей статье используются периоды для решения задачи, указанные в описании ее постановки: предбазовый, базовый, прогнозный, расчетный, а также период прогнозирования на отдаленную перспективу (далее – ППП). Наряду с эндогенными и экзогенными переменными используются предопределенные (экзогенные, включая «единицу» и t , и эндогенные с лаговыми значениями).

Если задачи прогнозирования решаются и для страны, и для ее регионов, то вначале определяется задача для страны, так как некоторые эндогенные переменные макромоделей страны могут участвовать в макромоделях регионов как экзогенные. Кроме того, прогнозирование развития экономики регионов на перспективу происходит по сценариям, определенным при решении задачи прогнозирования для страны, каждый из которых характеризуется значениями некоторых экзогенных переменных в ППП (далее такие переменные называются фиксированными).

Информация для исследований авторов формируется, в основном, на базе отчетности Росстата [5] и Банка России [6]. В последней по времени серии исследований, завершившейся в середине 2020 г., использовалась информация из данных источников за 2004-2015 гг. Основные результаты, полученные в процессе ее выполнения, представлены в [4] (по России, Центральному федеральному округу и городу Москве), а также в других публикациях авторов.

В конце 2020 г. началась новая серия исследований, цель которой – решение задач прогнозирования

для России и ее регионов с учетом информации из [5,6] за 2016-2019 гг., не использовавшейся ранее, в частности, нового классификатора видов экономической деятельности (ОКВЭД2). Сначала была решена задача прогнозирования для России. В [7] представлены полученные в процессе ее решения основные результаты и информация, необходимая для решения задач прогнозирования для регионов России: значения в ППП экзогенных переменных, являющихся эндогенными в задаче для России, и сценарии прогнозирования на перспективу.

Основные цели настоящего исследования – разработка, с учетом новой информации, макромоделей ряда регионов России и их применение для прогнозирования развития экономики этих регионов в ППП по сценариям, представленным в [7]. В настоящей статье рассматриваются результаты исследования по Центральному и Приволжскому федеральным округам. Дополнительная цель исследования – оценка точности прогнозов показателей экономики Центрального федерального округа на 2016-2019 гг., полученных в предыдущей серии исследований.

1. Формирование информации для решения задач прогнозирования для регионов

Далее термин «объем отгруженных товаров, выполненных работ и услуг» заменяется сильно сокращенной аббревиатурой ОТР (объем товаров и работ) [4], а выражение «информация по показателю за период» означает показатель в этом периоде.

В 2017 г. произошло изменение в отчетности Росстата [5], важное для новой серии исследований: при формировании официальной статистической информации стал использоваться новый классификатор видов экономической деятельности (ОКВЭД2), в котором, по сравнению со старым (ОКВЭД), полностью изменены разделы, относящиеся к промышленному производству. Поэтому было обновлено множество эндогенных переменных макромоделей России [7].

Множество эндогенных переменных макромоделей любого региона также подлежит обновлению, хотя и в меньшем объеме, чем в макромоделей России, поскольку в макромоделях регионов не участвуют ОТР по подразделам упомянутых разделов. Независимо от региона, обновление происходит следующим образом: исключаются две переменные (ОТР и индекс производства по производству и распределению электроэнергии, газа и воды); включаются четыре переменные (ОТР и индексы производства по двум разделам ОКВЭД2:

«обеспечение электрической энергией, газом и паром и кондиционирование воздуха» и «водоснабжение, водоотведение, организация сбора и утилизации отходов и деятельности по ликвидации загрязнений»); остаются шесть переменных (ОТР и индексы производства по добыче полезных ископаемых и по обрабатывающим производствам, индекс промышленного производства, индекс цен производителей промышленных товаров), по которым информация, использовавшаяся авторами ранее, начинается с 2004 г. или с 2005 г., а обновленная – с более поздних лет.

Кроме того, в макромоделли регионов добавляются новые переменные, аналогичные добавленным авторами в макромоделль России [7]; это – среднемесячный прожиточный минимум на душу населения и индекс производства продукции сельского хозяйства. Первая из них может отсутствовать в макромоделлях некоторых регионов (например, федеральных округов).

Процесс формирования информации для решения задач прогнозирования проходит по единым принципам для всех регионов, с учетом периодов для решения, указанных в [7] (предбазовый – 2012 г., базовый – 2013-2018 гг., прогнозный – 2019 г., расчетный – 2013-2019 гг., ППП – 2019-2028 гг.). Большая часть информации, необходимой для прогнозирования, формируется стандартным образом: путем непосредственного заимствования информации из [5] или преобразованием последней с применением обычных арифметических действий.

Нестандартным образом формируется часть информации по тем показателям, по которым в [5] она обновлена ввиду перехода к применению ОКВЭД2 (по четырем показателям – за 2013-2015 гг., по шести – за 2013-2016 гг.). Для каждого из них, как и в [7] для показателей экономики России, строится упрощенная модель [4] его зависимости от времени, по которой путем экстраполяции вычисляются его недостающие значения. Аналогично формируется информация по валовому региональному продукту (ВРП) за 2019 г. ввиду ее отсутствия в начале настоящего исследования. Для этого показателя тоже строится упрощенная модель его зависимости от времени, по которой путем экстраполяции вычисляется его значение в 2019 г.

2. Методика и решение задачи прогнозирования для региона

Подробные описания методики и процесса решения задачи прогнозирования для любого объекта (в частности, региона) представлены в [4].

Поэтому в настоящей статье такие описания даются в сильно сокращенном виде.

Для решения задачи прогнозирования применяется методика, неоднократно используемая авторами; ее основные средства – двухшаговый метод наименьших квадратов (МНК) и комбинация уравнений регрессии.

Двухшаговый МНК применяется, согласно подходу, описанному в [8], при формировании макромоделли в виде системы одновременных уравнений для оценивания параметров зависимостей одних эндогенных переменных от других и от predetermined переменных.

Комбинация уравнений регрессии – это разработанная авторами специальная методика, которая применяется для формирования уравнений видов (1) и (2) посредством комбинации основного и нескольких дополнительных уравнений регрессии.

В процессе решения задачи прогнозирования для региона можно выделить пять последовательных выполняемых этапов.

На 1-м этапе формируются модели зависимостей эндогенных переменных от времени в базовом периоде.

На 2-м этапе формируются модели зависимостей эндогенных переменных от других факторов и времени в базовом периоде и строится макромоделль как система уравнений этих моделей.

На 3-м этапе макромоделль преобразуется в систему формул, выражающих эндогенные переменные через predetermined и используемые при прогнозировании на перспективу.

На 4-м этапе формируются упрощенные модели зависимостей эндогенных переменных от времени в расчетном периоде.

На 5-м этапе эндогенные переменные прогнозируются на перспективу по сценариям, определенным при решении задачи прогнозирования для России.

В [7] указаны параметры, используемые при решении задачи прогнозирования для России, значения которых изменились по сравнению с [4] (например, минимально желательное количество факторов-аргументов модели эндогенной переменной). Новые значения таких параметров используются и при решении задач прогнозирования для регионов.

Сценарии прогнозирования развития экономики России на перспективу, использовавшиеся в [7], далее условно обозначены как 1-й и 2-й сценарии. Фиксированными экзогенными переменными в них являются мировые цены нефти Юралс и природного газа и учетная цена золота. Функции времени в уравнениях моделей их динамики в ППП представлены в табл.1.

Табл. 1

Функции времени в уравнениях моделей динамики фиксированных экзогенных переменных в ППП

Показатель	Функция времени в уравнении модели динамики показателя	
	1-й сценарий	2-й сценарий
Мировая цена нефти Юралс	$36,00892+1862505/t^4$	$59,03893+3862,905\cos((2\pi/3)t)/t^2$
Мировая цена природного газа	$95,97354-0,04229t^2\cdot\cos(\pi t)$	$95,84604-6849,58\cos(\pi t)/t^2$
Учетная цена золота	$3495,646-4633330/t^3$	$5955,509-58339,5/t$

С использованием описанной методики были решены задачи прогнозирования для Центрального и Приволжского федеральных округов. Для каждого из этих регионов была сформирована макро модель, множество переменных которой соответствует ОКВЭД2, после чего с ее применением было выполнено прогнозирование развития экономики региона на перспективу по сценариям, использовавшимся в [7] для России.

3. Модели одного показателя экономики Центрального и Приволжского федеральных округов

В качестве примеров моделей зависимостей эндогенных переменных макромоделей от других факторов и времени рассмотрим модели оборота розничной торговли. Здесь и далее обозначения переменных аналогичны использовавшимся в [4,7]. Оценка качества прогноза по модели равна модулю относительного отклонения прогнозного значения фактора-функции от фактического в прогнозном году [4].

Модель оборота розничной торговли в Центральном федеральном округе имеет вид:

$$\ln \text{ОРТ}(t) = 12,97895 + 0,182391 \ln \text{ИМ}(t-1) + 0,014708 \text{ИПЭГП}(t) - 0,01091 \text{ИПОБР}(t) - 0,00652 \text{ИПСХ}(t) + 0,079839t.$$

Здесь ОРТ – оборот розничной торговли; ИМ – импорт; ИПЭГП – индекс производства по обеспечению электрической энергией, газом и паром и кондиционированию воздуха; ИПОБР – индекс производства по обрабатывающим производствам; ИПСХ – индекс производства продукции сельского хозяйства.

Уравнение модели получено посредством комбинации основного уравнения

$$\ln \text{ОРТ}(t) = 12,22708 + 0,182391 \ln \text{ИМ}(t-1) + 0,014708 \text{ИПЭГП}(t) - 0,01091 \text{ИПОБР}(t) + 0,084499t$$

и дополнительного уравнения

$$\ln(\text{ОРТ}(t)/\text{ОРТ}(t)^r) = 0,751867 - 0,00652 \text{ИПСХ}(t) - 0,00466t,$$

где $\text{ОРТ}(t)^r$ – расчетные значения $\text{ОРТ}(t)$, вычисленные с применением основного уравнения.

Оценка качества прогноза по модели составляет 0,148813%.

Модель оборота розничной торговли в Приволжском федеральном округе имеет вид:

$$\ln \text{ОРТ}(t) = 13,34113 + 0,006589 \text{ИПЦ}(t) + 0,058141 \ln \text{ИМ}(t) + 0,052773t.$$

Здесь ОРТ – оборот розничной торговли; ИПЦ – индекс потребительских цен; ИМ – импорт. Уравнение модели является основным; дополнительные отсутствуют.

Оценка качества прогноза по модели составляет 0,31451%.

4. Динамика важнейших показателей экономики Центрального и Приволжского федеральных округов

Далее рассматривается динамика важнейших показателей экономики Центрального и Приволжского федеральных округов, количество которых в каждом округе равно 21 – половине от количества эндогенных переменных его макро модели. Прогнозы любого показателя, вообще говоря, зависят от сценария, но многие показатели имеют в обоих сценариях один и тот же тип динамики в ППП (например, монотонный рост и т.п.). Далее динамика таких показателей описывается без указания сценариев.

Среднегодовые темпы прироста в ППП важнейших показателей экономики Центрального и Приволжского федеральных округов, измеряемых не в процентах, представлены в табл. 2.

В динамике большинства (10) показателей экономики Центрального федерального округа имеется много общего. Они монотонно растут; самый быстрый рост чаще всего происходит в 2020 г., а самый медленный – в 2027 г. Тенденция к замедлению темпов прироста в ППП имеется в 1-м сценарии у объема платных услуг населению (начиная с 2026 г.).

Динамика семи показателей имеет особенности. Динамика экспорта и общей численности

Табл. 2

Среднегодовые темпы прироста в ППП важнейших показателей экономики
Центрального и Приволжского федеральных округов (%)

Показатель	Среднегодовые темпы прироста в федеральных округах			
	Центральный		Приволжский	
	1-й сценарий	2-й сценарий	1-й сценарий	2-й сценарий
Валовой региональный продукт	7,3	7,4	6,8	6,8
Инвестиции в основной капитал	7,7	7,6	4,7	4,7
ОТР по добыче полезных ископаемых	8,1	8,1	7,2	7,4
ОТР по обрабатывающим производствам	5,5	5,5	6,4	6,4
ОТР по обеспечению электрической энергией, газом и паром и кондиционированию воздуха	1,9	2,0	2,1	1,6
Объем работ по строительству	7,4	7,5	6,2	6,8
Оборот розничной торговли	7,4	7,3	6,1	6,1
Объем платных услуг населению	4,7	4,9	3,6	3,5
Доходы бюджетов субъектов федерации	7,7	7,4	6,9	6,6
Разность (сальдо) прибылей и убытков организаций	6,5	6,4	7,8	7,9
Экспорт	-1,2	-1,3	-4,3	-4,0
Импорт	-0,31	-0,39	-1,5	-1,5
Среднемесячная номинальная зарплата одного работника	7,4	7,2	6,6	6,3
Численность занятых в экономике	0,67	0,31	-2,4	-2,7
Общая численность безработных	-6,8	-6,7	-3,4	-3,4
Потребность работодателей в работниках	-0,26	-0,26	-1,2	-1,5
Ввод в действие жилых домов	0,72	0,64	0,90	0,80

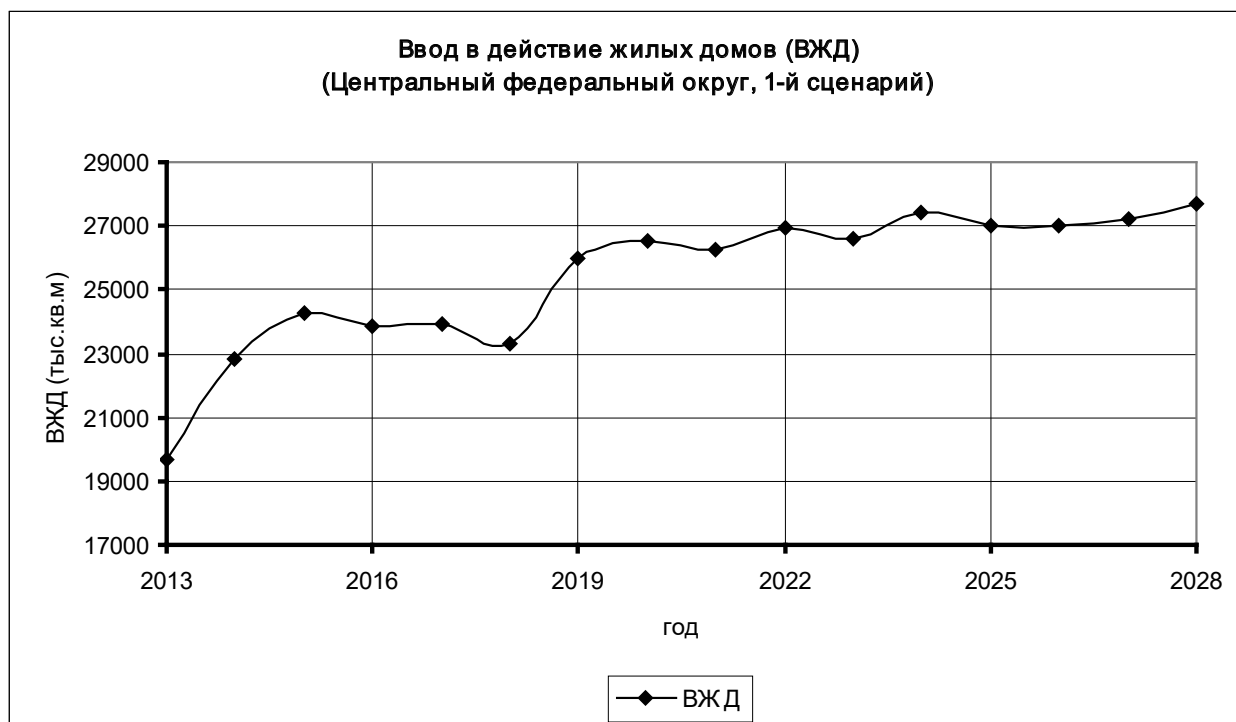


Рис. 1. Динамика ввода в действие жилых домов в Центральном федеральном округе в базовом периоде и его прогноз на перспективу по 1-му сценарию

безработных сходна с описанной выше, но с той разницей, что эти показатели убывают (экспорт растет в одном году ППП в 1-м сценарии и в двух – во 2-м). Импорт и потребность работодателей в работниках совершают колебания с периодом три года, а численность занятых в экономике – колебания без определенного периода. ОTR по обеспечению электрической энергией, газом и паром и кондиционированию воздуха в 1-м сценарии сначала монотонно растет, а начиная с 2024 г. совершает колебания с периодом два года, но во 2-м имеет почти такую же динамику, как описанная выше (убывает только в 2028 г.). Ввод в действие жилых домов в 1-м сценарии совершает колебания без определенного периода, но во 2-м сначала монотонно растет, а начиная с 2025 г. совершает колебания с периодом два года.

График динамики ввода в действие жилых домов в Центральном федеральном округе в базовом периоде и его прогноза на перспективу по 1-му сценарию представлен на рис. 1.

В динамике большинства (11) показателей экономики Приволжского федерального округа имеется много общего. Они растут либо монотонно, либо почти монотонно, но с убыванием в одном или в двух годах ППП (это происходит у одного показателя в 1-м сценарии и у четырех во 2-м); самый быстрый рост чаще всего происходит в 2020 г., а самый медленный – в 2027 г. Тенденция к за-

медлению темпов прироста в ППП имеется в 1-м сценарии у разности (сальдо) прибылей и убытков организаций (начиная с 2025 г.).

Динамика шести показателей имеет особенности. Динамика экспорта, импорта, численности занятых в экономике, общей численности безработных и потребности работодателей в работниках сходна с описанной выше, но с той разницей, что эти показатели убывают (в каждом сценарии в одном году ППП растет потребность работодателей в работниках. Кроме того во 2-м сценарии в одном году ППП растет экспорт и в двух – общая численность безработных). Ввод в действие жилых домов в 1-м сценарии совершает колебания без определенного периода, но во 2-м сначала монотонно растет, а начиная с 2022 г. совершает колебания с периодом два года.

График динамики ввода в действие жилых домов в Приволжском федеральном округе в базовом периоде и его прогноза на перспективу по 1-му сценарию представлен на рис. 2.

Средние значения в ППП важнейших показателей экономики Центрального и Приволжского федеральных округов, измеряемых в процентах, представлены в табл. 3.

Динамика показателей экономики Центрального федерального округа разнообразна. Индекс промышленного производства сначала монотонно растет, но начиная с 2022 г. в 1-м сценарии продол-

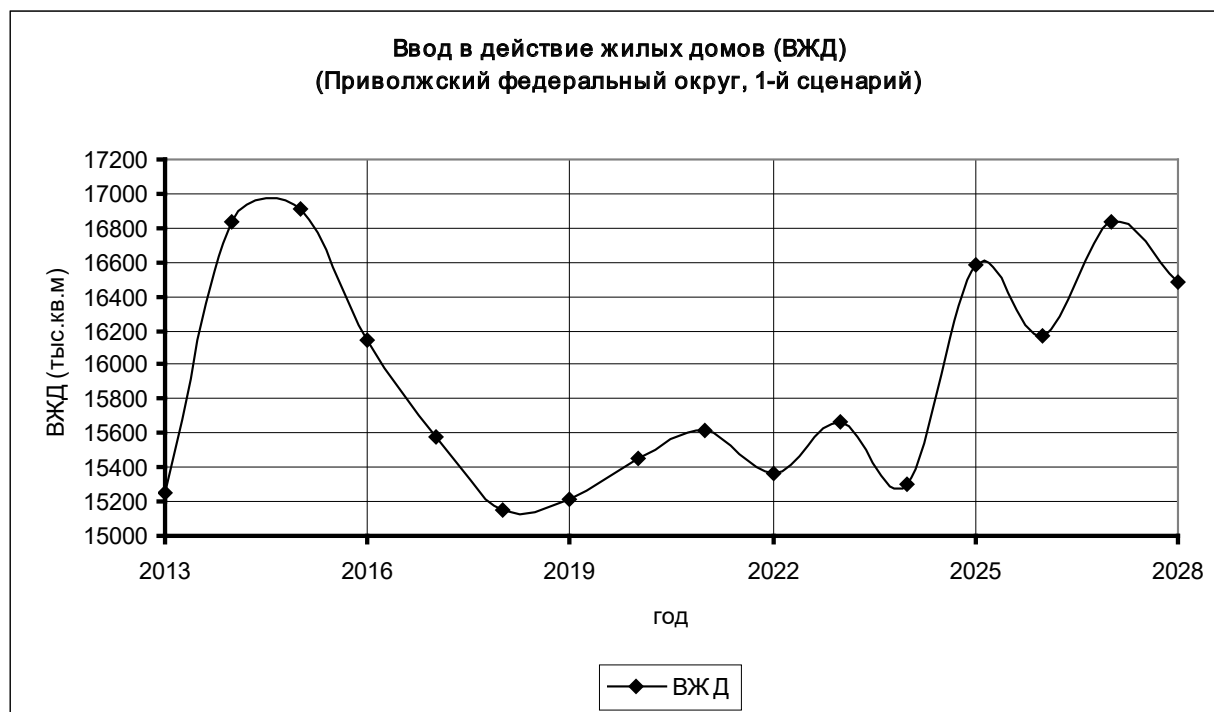


Рис. 2. Динамика ввода в действие жилых домов в Приволжском федеральном округе в базовом периоде и его прогноза на перспективу по 1-му сценарию

Табл. 3

Средние значения в ППП важнейших показателей экономики Центрального и Приволжского федеральных округов (%)

Показатель	Средние значения в федеральных округах			
	Центральный		Приволжский	
	1-й сценарий	2-й сценарий	1-й сценарий	2-й сценарий
Индекс промышленного производства	114,7	115,0	108,9	109,0
Индекс производства по обрабатывающим производствам	116,0	115,8	101,7	102,0
Индекс цен производителей промышленных товаров	110,1	110,3	110,3	110,0
Индекс потребительских цен	100,4	101,1	93,7	94,4

жает монотонно расти, а во 2-м совершает колебания с периодом два года. Индекс производства по обрабатывающим производствам в 1-м сценарии почти монотонно растет (убывает только в 2028 г.), а во 2-м совершает колебания без определенного периода. Индекс цен производителей промышленных товаров совершает колебания с периодом два года. Индекс потребительских цен почти монотонно убывает (растет в одном году ППП в каждом сценарии).

График динамики индекса производства по обрабатывающим производствам в Центральном федеральном округе в базовом периоде и его прогноза на перспективу по 1-му сценарию представлен на рис. 3.

Динамика показателей экономики Приволжского федерального округа разнообразна. Индекс

промышленного производства сначала монотонно растет, а начиная с 2023 г. совершает колебания с периодом три года. Индекс производства по обрабатывающим производствам в 1-м сценарии сначала монотонно растет, а начиная с 2022 г. совершает колебания с периодом два года, но во 2-м совершает колебания с периодом три года во всем ППП. Индекс цен производителей промышленных товаров совершает колебания с периодом два года. Индекс потребительских цен в 1-м сценарии почти монотонно убывает (растет в двух годах ППП), а во 2-м совершает колебания без определенного периода.

График динамики индекса производства по обрабатывающим производствам в Приволжском федеральном округе в базовом периоде и его прогноза на перспективу по 1-му сценарию представлен на рис. 4.

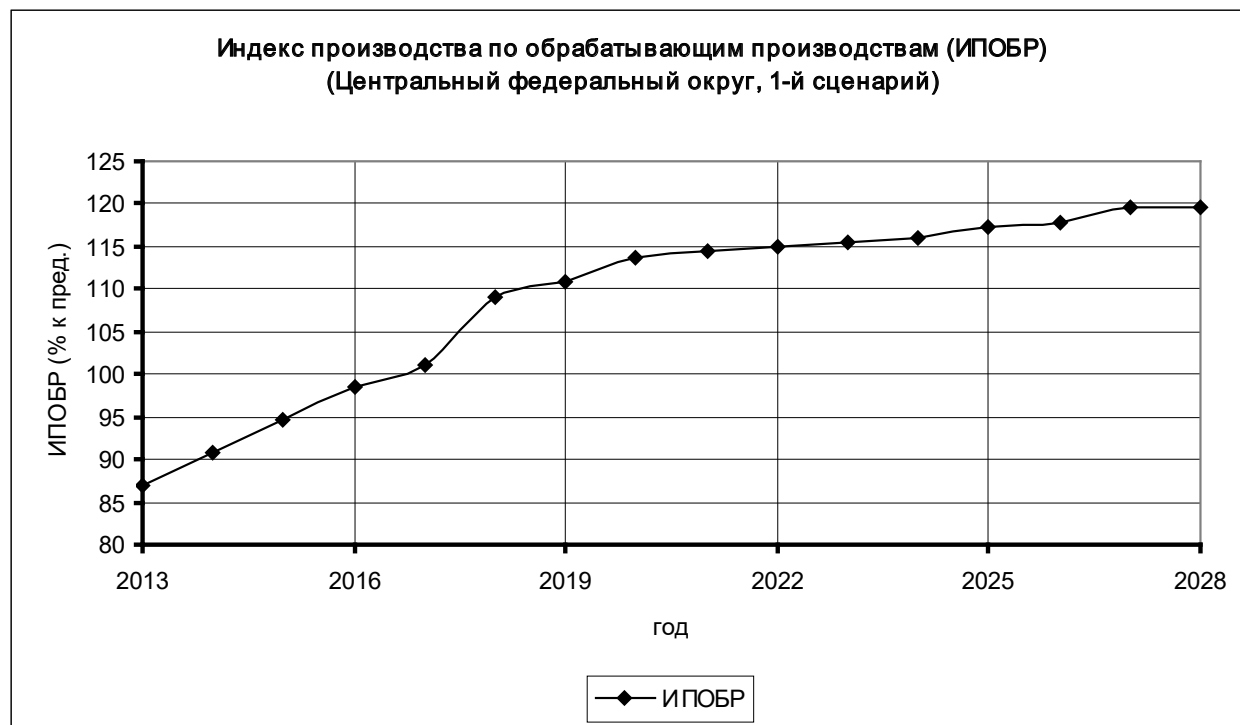


Рис. 3. Динамика индекса производства по обрабатывающим производствам в Центральном федеральном округе в базовом периоде и его прогноз на перспективу по 1-му сценарию

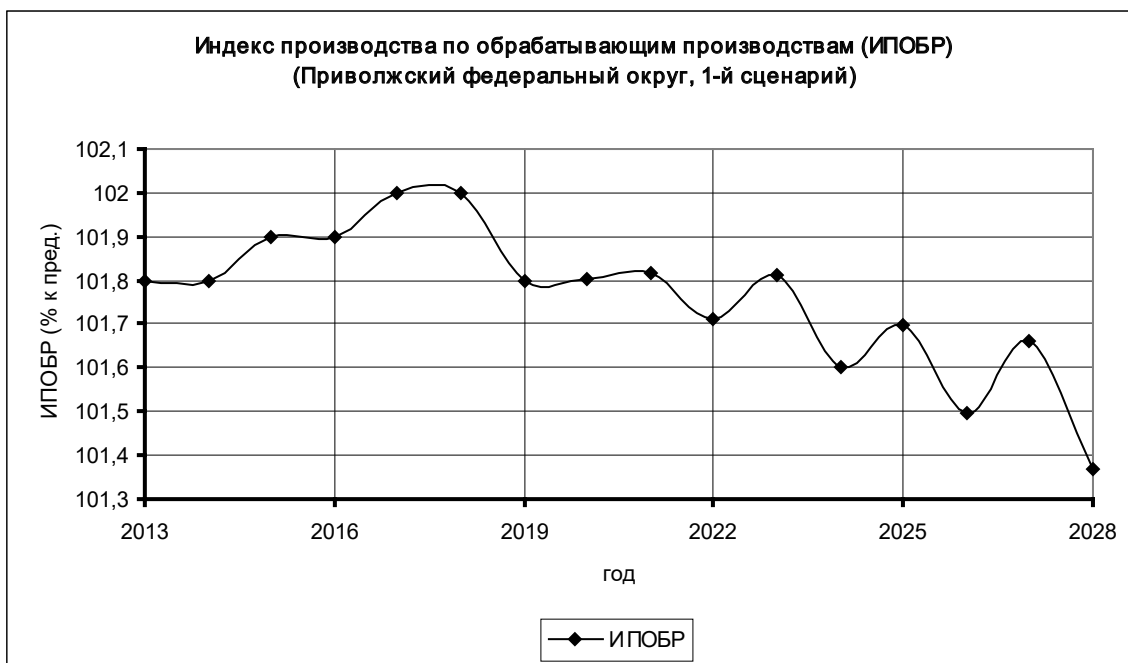


Рис. 4. Динамика индекса производства по обрабатывающим производствам в Приволжском федеральном округе в базовом периоде и его прогноз на перспективу по 1-му сценарию

5. Сравнение динамики показателей экономики в сценариях, в регионах и в периодах

В [4] описан критерий для определения сценария, предпочтительного для развития экономики некоторого объекта (страны или региона). Рассмотрим его в обобщенном виде с целью использования для определения объекта с более динамично развивающейся экономикой.

Пусть имеется несколько векторов, элементами которых являются данные о показателях экономики (например, представленные в табл. 2 и 3): среднегодовые темпы изменения показателей, измеряемых не в процентах, и средние значения показателей, измеряемых в процентах (индексов производства и цен). Возможны два варианта формирования информации в векторах. Если фиксируется некоторый объект, то каждый вектор содержит информацию о развитии его экономики по одному сценарию. Если фиксируется некоторый сценарий, то каждый вектор содержит информацию о развитии экономики одного объекта по этому сценарию.

Для определения лучшего вектора (то есть, либо сценария, либо объекта) выполняется их поэлементное сравнение по следующим принципам:

- лучшим среднегодовым темпом изменения показателя является наибольший (за исключением небольшого количества показателей, для которых желательно обратное);

- лучшим средним значением любого индекса производства является наибольшее;
- лучшим средним значением любого индекса цен является наименьшее;
- при равенстве лучших элементов в нескольких векторах полагается, что для соответствующего показателя равноценны все эти сценарии, либо все эти объекты.

В итоге поэлементного сравнения лучшим оказывается вектор, в котором количество лучших элементов наибольшее. Если оно одинаково в нескольких векторах, то можно либо не отдавать предпочтение ни одному из них, либо использовать какой-то дополнительный критерий (один такой случай представлен в [4]). Таким образом, можно определить либо лучший сценарий для объекта (предпочтительный для развития его экономики), либо лучший объект для сценария (с более динамично развивающейся экономикой).

Описанный критерий можно назвать «критерием для определения лучшего вектора». Применяя его для двух сценариев и двух регионов и учитывая, что в любом регионе единственным из важнейших показателей, для которого желателен меньший среднегодовой темп изменения, является общая численность безработных, можно сделать следующие выводы.

Для развития экономики Центрального федерального округа предпочтителен 1-й сценарий, яв-

ляющийся лучшим для 13 важнейших показателей. Наиболее заметно его превосходство для доходов бюджетов субъектов федерации, индекса потребительских цен, численности занятых в экономике, среднемесячной номинальной зарплаты одного работника. Для пяти показателей (например, для объема платных услуг населению) лучшим является 2-й сценарий, а для трех оба сценария равноценны.

Для развития экономики Приволжского федерального округа предпочтителен 1-й сценарий, являющийся лучшим для восьми важнейших показателей. Наиболее заметно его превосходство для ОТР по обеспечению электрической энергией, газом и паром и кондиционированию воздуха, а также для тех же показателей, что и в Центральном федеральном округе. Для семи показателей (например, для объема работ по строительству) лучшим является 2-й сценарий, а для шести – оба сценария равноценны.

При развитии экономики по 1-му сценарию (предпочтительному для обоих регионов, а также всей России [7]) более динамично развивается экономика Центрального федерального округа, являющегося лучшим объектом для 16 важнейших показателей. Наиболее заметно его превосходство для обоих индексов производства и инвестиций в основной капитал. Для пяти показателей (например, для индекса потребительских цен)

лучшим объектом является Приволжский федеральный округ.

Выбрав 1-й сценарий как предпочтительный, можно провести сравнение динамики показателей экономики каждого региона в базовом периоде и в ППП (при прогнозировании по этому сценарию) для выявления показателей с самыми крупными изменениями динамики в ППП.

Изменения среднегодовых темпов прироста в ППП (при прогнозировании по 1-му сценарию) некоторых показателей экономики Центрального и Приволжского федеральных округов, измеряемых не в процентах, по сравнению с их величинами в базовом периоде представлены в табл.4. В Центральном федеральном округе у первых трех показателей наблюдается ускорение этих темпов (их разность в ППП и в базовом периоде положительна), а у последних пяти – наибольшее замедление (эта разность меньше -8%). В Приволжском федеральном округе у первых четырех показателей наблюдается наибольшее ускорение этих темпов (их разность в ППП и в базовом периоде больше 2%), а у последних четырех – наибольшее замедление (эта разность меньше -7%).

Изменения среднегодовых темпов убывания в ППП (при прогнозировании по 1-му сценарию) некоторых показателей экономики Центрального и Приволжского федеральных округов, измеряемых

Табл. 4

Изменения среднегодовых темпов прироста в ППП (при прогнозировании по 1-му сценарию) некоторых показателей экономики Центрального и Приволжского федеральных округов по сравнению с их величинами в базовом периоде (%)

Федер. округ	Показатель	Среднегод. темп прироста		Разн. среднегод. темп. прироста
		Базовый период	ППП	
Центральный	Оборот розничной торговли	6,3	7,4	1,1
	Численность занятых в экономике	0,45	0,67	0,22
	Оборот общественного питания	5,9	6,1	0,19
	ОТР по водоснабжению, водоотведению, организации сбора и утилизации отходов и деятельности по ликвидации загрязнений	16,5	7,5	-9,0
	ОТР по обеспечению электрической энергией, газом и паром и кондиционированию воздуха	11,6	1,9	-9,7
	Кредиторская задолженность организаций	12,9	2,2	-10,7
	ОТР по добыче полезных ископаемых	20,9	8,1	-12,8
	ОТР по обрабатывающим производствам	18,7	5,5	-13,2
Приволжский	Оборот общественного питания	3,1	6,4	3,3
	Инвестиции в основной капитал	1,6	4,7	3,1
	Объем работ по строительству	3,4	6,2	2,8
	Среднемесячные потребительские расходы на душу населения	5,4	7,5	2,1
	ОТР по обрабатывающим производствам	13,5	6,4	-7,1
	ОТР по добыче полезных ископаемых	14,8	7,2	-7,6
	ОТР по обеспечению электрической энергией, газом и паром и кондиционированию воздуха	11,1	2,1	-9,0
	Налоги, сборы и иные обязательные платежи в федеральном бюджете	18,1	7,8	-10,3

Табл. 5

Изменения среднегодовых темпов убывания в ППП (при прогнозировании по 1-му сценарию) некоторых показателей экономики Центрального и Приволжского федеральных округов по сравнению с их величинами в базовом периоде (%)

Федер. округ	Показатель	Среднегод. темп убывания		Разн. среднегод. темп. убывания
		Базовый период	ППП	
Центральный	Импорт	-5,2	-0,31	4,9
	Потребность работодателей в работниках	-2,1	-0,26	1,8
	Экспорт	-2,5	-1,2	1,3
	Общая численность безработных	-2,4	-6,8	-4,4
Приволжский	Экспорт	-8,7	-4,3	4,4
	Импорт	-4,7	-1,5	3,2
	Потребность работодателей в работниках	-4,3	-1,2	3,1
	Численность безработных, зарегистрированных в службе занятости	-4,5	-6,8	-2,3

не в процентах, по сравнению с их величинами в базовом периоде представлены в табл.5. В Центральном федеральном округе у первых трех показателей наблюдается замедление этих темпов (их разность в ППП и в базовом периоде положительна), а у последнего – наибольшее ускорение (эта разность меньше – 4%). В Приволжском федеральном округе у первых трех показателей наблюдается наибольшее замедление этих темпов (их разность в ППП и в базовом периоде больше 3%), а у последнего – наибольшее ускорение (эта разность меньше -2%).

Изменения средних значений в ППП (при прогнозировании по 1-му сценарию) некоторых показателей экономики Центрального и Приволжского федеральных округов, измеряемых в процентах, по сравнению с их величинами в базовом периоде представлены в табл.6. В Центральном федеральном округе у первых двух показателей наблюдается наибольшее увеличение этих значений (их разность в ППП и в базовом периоде больше 17%), а у последних двух – наибольшее уменьшение (эта разность меньше – 4%). В Приволжском

федеральном округе у первых двух показателей наблюдается наибольшее увеличение этих значений (их разность в ППП и в базовом периоде больше 11%), а у последних двух – наибольшее уменьшение (эта разность меньше -12%).

6. Оценка точности прогнозов показателей экономики Центрального федерального округа на 2016-2019 гг.

Рассмотрим основные результаты, связанные с дополнительной целью настоящего исследования – оценкой точности прогнозов показателей экономики Центрального федерального округа на 2016-2019 гг., полученных с использованием старой макромоделей [4], путем их сравнения с фактической информацией за эти годы. Поскольку публикация в [5] такой информации по двум показателям старой макромоделей прекратилась, а еще по шести существенно обновлена и, вероятно, стала несопоставимой с использовавшейся в [4], оценку точности прогнозов удалось выполнить только для 31 показателя старой макромоделей. Хотя в [4] для прогно-

Табл. 6

Изменения средних значений в ППП (при прогнозировании по 1-му сценарию) некоторых показателей экономики Центрального и Приволжского федеральных округов по сравнению с их величинами в базовом периоде (%)

Федер. округ	Показатель	Среднее значение		Разность средних значений
		Базовый период	ППП	
Центральный	Индекс производства по обрабатывающим производствам	96,8	116,0	19,2
	Индекс промышленного производства	97,0	114,7	17,7
	Индекс тарифов на грузовые перевозки	106,3	101,4	-4,9
	Индекс потребительских цен	107,7	100,4	-7,3
Приволжский	Индекс производства по добыче полезных ископаемых	95,4	113,5	18,1
	Индекс промышленного производства	97,7	108,9	11,2
	Индекс потребительских цен	106,6	93,7	-12,9
	Индекс цен производителей сельскохозяйственной продукции	106,6	90,7	-15,9

зирования использовались два сценария, но, ввиду близости прогнозов большинства показателей по этим сценариям, для оценки точности применялся только тот сценарий, который в [4] условно обозначен как 2-й. Он был разработан в 2017 г. и оказался предпочтительным для развития экономики России и Центрального федерального округа [4], но не имеет ничего общего с тем, который является 2-м в настоящем исследовании. Точность прогноза любого показателя в периоде оценивалась, как и в [4], по среднему квадратическому отклонению (СКО) его прогнозных значений от фактических (для краткости – просто СКО).

У 31 показателя СКО распределились так: у девяти СКО не превышает 5%, у шести лежит в интервале от 5 до 10%, еще у шести – от 10 до 20%, а у десяти превышает 20%. Поскольку у 15 показателей СКО меньше 10%, а у 21 меньше 20%, можно считать такой результат вполне удовлетворительным. Он выглядит лучше аналогичного результата [4], полученного при оценке точности прогнозов на 2014-2015 гг., где у 24 из 38 показателей СКО меньше 10%. Более того, таких крупных СКО, как в [4] у импорта (68,9%) и экспорта (62,5%), в настоящем исследовании нет. Максимальное СКО имеет налог на прибыль организаций в бюджетах субъектов федерации (37,6%); его фактические значения значительно больше прогнозных, причем такое превышение с каждым годом растет. Далее даны (в порядке возрастания СКО) оценки точности прогнозов 15 важнейших показателей, представленных в табл. 2 и 3.

Очень точными (имеющими малые СКО) оказались прогнозы индекса потребительских цен (2,0%), численности занятых в экономике (2,6%) и среднемесячной номинальной заработной платы одного работника (3,2%). Несколько менее точны прогнозы оборота розничной торговли (6,0%), потребности работодателей в работниках (6,6%) и объема платных услуг населению (8,1%).

Среди показателей со средними по точности прогнозами: ввод в действие жилых домов (10,2%), инвестиции в основной капитал (10,9%), валовой региональный продукт (11,3%) и доходы бюджетов субъектов федерации (18,6%).

К числу показателей с наименее точными прогнозами относятся объем работ по строительству (22,2%), общая численность безработных (24,2%), импорт (26,7%), разность (сальдо) прибылей и убытков организаций (36,9%) и экспорт (37,2%). Фактические значения общей численности безработных, импорта и экспорта значительно меньше прогнозных, а у двух других показателей наблюдается обратное явление.

7. Прогнозирование динамики показателей по структуре объема отгруженной продукции

После решения задачи прогнозирования для региона возможно прогнозирование динамики показателей его экономики, не вошедших в макромоделю. В настоящей статье рассматриваются показатели по структуре объема отгруженной продукции (работ, услуг) (далее – СОП) по двум видам экономической деятельности: добыче полезных ископаемых и обрабатывающим производствам. Каждый такой показатель является долей (в процентах) отгруженной продукции (работ, услуг) (далее – ДПР) по некоторой группе видов промышленного производства в ОТР по всему соответствующему виду деятельности. Недостающая информация за начало базового периода по этим показателям формируется также, как и по переменным макромоделю региона.

В настоящем исследовании предполагается, что показатели по СОП не являются взаимозависимыми. Поэтому для каждого региона возможно построение такой макромоделю этих показателей, в которой последние являются эндогенными переменными, зависящими только от экзогенных, которыми могут быть эндогенные и экзогенные переменные макромоделю региона. Процесс прогнозирования динамики показателей по СОП упрощается по сравнению с описанным выше процессом решения задачи прогнозирования для региона: ввиду отсутствия взаимозависимости эндогенных переменных не требуется выполнение 1-го и 3-го этапов процесса.

Для Центрального и Приволжского федеральных округов были построены макромоделю показателей по СОП, с применением которых было выполнено прогнозирование динамики этих показателей на перспективу по сценариям, описанным выше. Далее рассматривается (достаточно кратко) динамика показателей по одной группе видов добычи полезных ископаемых и шести группам видов обрабатывающих производств в каждом регионе с наибольшими средними значениями ДПР в ППП (далее такие группы называются важнейшими). При формировании множеств важнейших групп оказалось, что эти множества в обоих регионах совпадают.

Средние значения в ППП ДПР по важнейшим группам видов добычи полезных ископаемых и обрабатывающих производств в Центральном и Приволжском федеральных округах в ОТР по соответствующим видам деятельности представлены в табл. 7.

В любом году значение ОТР по некоторой группе видов промышленного производства вы-

Табл. 7

Средние значения в ППП ДПР по важнейшим группам видов добычи полезных ископаемых и обрабатывающих производств в Центральном и Приволжском федеральных округах в ОТР по соответствующим видам деятельности (%)

Вид деятельности	Группа видов промышленного производства	Средние значения в федеральных округах			
		Центральный		Приволжский	
		1-й сценарий	2-й сценарий	1-й сценарий	2-й сценарий
Добыча полезных ископаемых	Добыча сырой нефти и природного газа	82,2	82,1	82,9	82,9
Обрабатывающие производства	Производство пищевых продуктов, напитков и табачных изделий	16,9	16,9	12,9	13,0
	Производство кокса, нефтепродуктов, резиновых и пластмассовых изделий	27,1	27,1	29,5	29,4
	Производство химических веществ, химических продуктов, лекарственных средств и материалов, применяемых в медицинских целях	6,7	6,7	12,7	12,8
	Металлургическое производство и производство готовых металлических изделий, кроме машин и оборудования	19,6	19,6	10,0	10,0
	Производство компьютеров, электронных и оптических изделий и электрического оборудования	6,6	6,5	6,9	7,0
	Производство машин и оборудования, не включенных в другие группировки, и транспортных средств и оборудования	11,9	11,9	18,8	18,8

числяется путем умножения ДПР по этой группе на отношение ОТР по всему соответствующему виду деятельности к числу 100. Среднегодовые темпы прироста в ППП ОТР по важнейшим группам видов добычи полезных ископаемых и обрабатывающих производств в Центральном и Приволжском федеральных округах представлены в табл. 8.

Динамика ДПР и ОТР по важнейшим группам видов добычи полезных ископаемых и обрабатывающих производств позволяет сделать следующие выводы.

В обоих регионах более быстрыми темпами, чем ОТР по всей добыче полезных ископаемых, растут ОТР по добыче сырой нефти и природного газа.

В Центральном федеральном округе более быстрыми темпами, чем ОТР по всем обрабатывающим производствам, растут ОТР по металлургическому производству и производству готовых металлических изделий, кроме машин и оборудования, и по производству машин и оборудования, не включенных в другие группировки, и транспортных средств и оборудования.

Табл. 8

Среднегодовые темпы прироста в ППП ОТР по важнейшим группам видов добычи полезных ископаемых и обрабатывающих производств в Центральном и Приволжском федеральных округах (%)

Группа видов промышленного производства	Среднегодовые темпы прироста в федеральных округах			
	Центральный		Приволжский	
	1-й сценарий	2-й сценарий	1-й сценарий	2-й сценарий
Добыча сырой нефти и природного газа	8,8	8,8	7,3	7,5
Производство пищевых продуктов, напитков и табачных изделий	3,9	4,1	7,7	7,7
Производство кокса, нефтепродуктов, резиновых и пластмассовых изделий	5,3	5,2	8,2	8,0
Производство химических веществ, химических продуктов, лекарственных средств и материалов, применяемых в медицинских целях	5,0	4,9	2,1	2,0
Металлургическое производство и производство готовых металлических изделий, кроме машин и оборудования	9,0	8,8	3,6	3,7
Производство компьютеров, электронных и оптических изделий и электрического оборудования	3,1	3,1	7,7	7,6
Производство машин и оборудования, не включенных в другие группировки, и транспортных средств и оборудования	7,8	7,8	7,1	7,1

В Приволжском федеральном округе более быстрыми темпами, чем ОТР по всем обрабатывающим производствам, растут ОТР по производству кокса, нефтепродуктов, резиновых и пластмассовых изделий, по производству пищевых продуктов, напитков и табачных изделий, по производству компьютеров, электронных и оптических изделий и электрического оборудования и по производству машин и оборудования, не включенных в другие группировки, и транспортных средств и оборудования.

Заключение

В результате исследования сформированы модернизированные макромоделли Центрального и Приволжского федеральных округов с учетом нового классификатора видов экономической деятельности (ОКВЭД2) и с использованием информации, доступной в начале выполнения исследования (конец 2021 г.). С применением макромоделей выполнено прогнозирование развития экономики указанных регионов на 2019-2028 гг. по двум сценариям. Определены сценарии, предпочтительные для развития экономики каждого региона, а также регион с более динамично развивающейся экономикой. При сравнении полученных ранее прогнозов показателей экономики Центрального федерального округа на 2016-2019 гг. с фактической информацией выявлена вполне удовлетворительная точность этих прогнозов. В исследовании не отражено влияние на экономику страны специальной военной операции на Украине, начавшейся в 2022 г.

Галин Дмитрий Михайлович. Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», г. Москва, Россия. Старший научный сотрудник. Кандидат экономических наук. Количество печатных работ: 43. Область научных интересов: математические и инструментальные методы экономики, моделирование экономической динамики. E-mail: zavelsky@isa.ru (Ответственный за переписку).

Сумарокова Ирина Владимировна. Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», г. Москва, Россия. Техник 1-й категории. Количество печатных работ: 20. Область научных интересов: математические и инструментальные методы экономики. E-mail: zavelsky@isa.ru.

Литература

1. *Дмитриев М.Г., Петров А.П., Прончева О.Г.* Моделирование экономического роста с учетом миграционных потоков. // Труды ИСА РАН. 2019. Т. 69. Вып. 2. С.17-27.
2. *Широв А.А., Михеева Н.Н., Гусев М.С., Савчишина К.Е.* Макроэкономическая стабилизация и пространственное развитие экономики. // Проблемы прогнозирования. 2019. №5. С.3-15.
3. *Суворов А.В., Иванов В.Н., Буданова А.И.* Система макроэкономических балансов для прогнозирования экономики регионов России // Проблемы прогнозирования. 2021. № 2. С. 6-18.
4. *Галин Д.М., Сумарокова И.В.* Применение макроэкономических моделей России и ее регионов для прогнозирования их экономической динамики. // Труды ИСА РАН. 2019. Т. 69. Вып. 1. С. 37-49.
5. rosstat.gov.ru
6. www.cbr.ru
7. *Галин Д.М., Сумарокова И.В.* Прогнозирование развития экономики России с учетом нового классификатора видов экономической деятельности. // Труды ИСА РАН. 2022. Т. 72. Вып. 1. С. 35-47.
8. *Джонстон Дж.* Эконометрические методы / Пер с англ. М.: Статистика. 1980. 448 с. (Johnston J. Econometric methods. 2nd ed. Tokyo: McGraw-Hill, Kogakusha Ltd, 1972. 448 p.)

Forecasting development of economy of Russian regions with taking the new classification of kinds of economic activities into account

D.M. Galin, I.V. Sumarokova

Federal State Institution "Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences", Moscow, Russia

Abstract. Macromodels of two federal districts of Russia, constructed by authors, are considered in the article. These macromodels correspond to the new classification of kinds of economic activities. Results of forecasting development of economy of these regions with using macromodels for the period until 2028 year by two scenarios are presented.

Keywords: *forecasting development of economy, macromodel, models of variables, endogenous and exogenous variables, scenario, solving problem of forecasting, classification of kinds of economic activities, accuracy of forecast of indicator, dynamics of an indicator.*

DOI: 10.14357/20790279230203

References

1. *Dmitriev M.G., Petrov A.P., Proncheva O.G.* Modelirovanie ekonomicheskogo rosta s uchyotom migratsionnykh potokov [Modeling economic growth with migration flows]. // Trudy ISA RAN [Proceedings of Institute for Systems Analysis], 2019, 69(2):17-27.
2. *Shirov A.A., Mikheeva N.N., Gusev M.S., Savchishina K.E.* Makroekonomicheskaya stabilizatsiya i prostranstvennoe razvitie ekonomiki [Macroeconomic stabilization and spatial development of the economy]. // Problemy prognozirovaniya [Problems of forecasting], 2019, 5:3-15.
3. *Suvorov A.V., Ivanov V.N., Budanova A.I.* Sistema makroekonomicheskikh balansov dlya prognozirovaniya ekonomiki regionov Rossii [A system of macroeconomic balances for forecasting the economies of Russian regions]. // Problemy prognozirovaniya [Problems of forecasting], 2021, 2:6-18.
4. *Galina D.M., Sumarokova I.V.* Primenenie makroekonomicheskikh modeley Rossii i eyo regionov dlya prognozirovaniya ikh ekonomicheskoy dinamiki [Using macroeconomic models of Russia and its regions for forecasting their economic dynamics]. // Trudy ISA RAN [Proceedings of Institute for Systems Analysis], 2019, 69(1):37-49.
5. rosstat.gov.ru
6. www.cbr.ru
7. *Galina D.M., Sumarokova I.V.* Prognozirovanie razvitiya ekonomiki Rossii s uchyotom novogo klassifikatora vidov ekonomicheskoy deyatel'nosti [Forecasting development of economy of Russia with taking the new classification of kinds of economic activities into account]. // Trudy ISA RAN [Proceedings of Institute for Systems Analysis], 2022, 72(1):35-47.
8. *Johnston J.* Econometric methods. 2nd ed. Tokyo: McGraw-Hill, Kogakusha Ltd, 1972. 448 p.

Galina D.M. Senior research assistant, Kandidat of economic sciences. Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. E-mail: zavelsky@isa.ru.

Sumarokova I.V. Technician of the 1st category. Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. E-mail: zavelsky@isa.ru.

Интеллектуальный анализ данных и распознавание образов

Нейросетевой метод генерации последовательности символов для синтеза обучающей выборки изображений текста*

П.К. Злобин^{1,II}, Ю.С. Чернышова^{1,II}, А.В. Шешкус^{1,II}, В.В. Арлазаров^{1,II}

¹ Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», г. Москва, Россия

^{II} ООО «Smart Engines Service», г. Москва, Россия

Аннотация. Объем обучающей выборки – важный фактор при решении задачи оптического распознавания текста, при этом большинство исследований направлено на увеличение разнообразия искажений, которым подвергаются картинки. Однако внутренняя структура текстовой информации также влияет на точность результирующей модели. В статье рассмотрен основанный на искусственной нейронной сети метод генерации текста для создания синтетической обучающей выборки изображений, в котором возможно оперировать группами символов – алфавитными кластерами – и использовать последовательность кластеров для предсказания нового символа. Предложенный кластерный подход позволяет создавать неслучайные последовательности, сохраняющие основные свойства целевого языка, но при этом не реализуют полноценную языковую модель. Поскольку предложенный метод работает на небольшом числе кластеров, можно использовать небольшую обучающую выборку и легкую нейронную сеть. Результаты экспериментов с тремя открытыми наборами изображений документов, удостоверяющих личность, демонстрируют эффективность предложенного метода и возможность улучшения современных результатов для целевых полей.

Ключевые слова: обучающие данные, искусственные нейронные сети, оптическое распознавание символов, генерация текста, синтез данных.

DOI: 10.14357/20790279230204

Введение

Распознавание документов и, прежде всего, текста в них все шире применяется в повседневной жизни, так как помогает значительно сэкономить

время и повысить качество обслуживания клиентов. Технологии распознавания активно используются при обработке паспортов, банковских карт и медицинских документов.

При распознавании текстовой строки изображение одного или нескольких символов поступают

* Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект номер 19-29-09066).

на вход классификатора. При отдельном распознавании символов их контекст не имеет значения. Однако если на классификатор подается часть изображения, содержащая несколько символов, соседние символы начинают влиять на точность распознавания. Таким образом, при обучении классификатора важно учитывать окружение символа и обеспечивать его разнообразие.

Поскольку разные поля документов содержат разные символы и их сочетания относительно друг друга, обучающие данные должны создаваться с учетом этих особенностей. Например, один из вариантов написания даты представляет собой последовательность цифр, включающих день, месяц и год, разделенных знаками препинания. Этот вариант исключает наличие букв в его составе. Существуют поля документа, такие как имена людей, содержащие только буквенную последовательность символов за редкими исключениями. Машиночитаемая зона (МЧЗ, MRZ) имеет строгую структуру, так как она специально разработана для распознавания машинами [1]. Эта особенность поля важна при создании данных для обучения классификатора. На рис. 1 показан пример МЧЗ в документе из открытого набора данных MIDV-500 [2]. Таким образом, в документах существуют текстовые строки, которые обладают своей внутренней структурой, не отражающие в полной мере языковую модель. Для таких полей распознаватель с языковой моделью может привести к ухудшению качества распознавания.

Целью нашей работы является разработка метода генерации последовательности символов, которая будет использована для создания обучающей выборки изображений. Разрабатываемый метод учитывает N-граммы заранее заданных алфавитных кластеров. Этот метод позволяет создавать репрезентативные обучающие данные для нейронной сети, что повышает точность распознавания.



Рис. 1. Пример документа с полем МЧЗ из открытого набора данных MIDV-500

1. Обзор литературы

Классическое распознавание изображения текстовой строки включает в себя несколько этапов [3]: предварительная обработка, сегментация, извлечение признаков, классификация. Однако в настоящее время для распознавания текста используются методы глубокого обучения, которые позволяют избавиться от извлечения признаков и существенно уменьшить (или вообще убрать) предварительную обработку изображений, например, оставив только перевод цветного изображения в градации серого [4-6], а иногда и избежать посимвольной сегментации строки.

Распознающая нейронная сеть (распознаватель) обучается на изображениях, содержащих определенную последовательность символов. Существует два различных способа создания обучающих изображений: использование реальных базовых изображений с текстом и создание таких изображений [7]. В первом случае, на изображениях будет содержаться текст, передающий, как минимум, статистику распределения встречаемости букв и N-грамм в языке и содержащий данные в определенном формате, например, в России даты практически всегда пишут в порядке день-месяц-год. Во втором случае символьная последовательность, которая будет отпечатана на обучающих изображениях, создается алгоритмом генерации данных. Создание этой последовательности является важной частью генерации обучающих данных.

При создании текстового заполнения есть два принципиально разных метода и множество промежуточных вариантов. Итак, первый метод – это создание абсолютно случайной последовательности символов [8-10]. В таком случае в данных точно нет никакой языковой модели, которую могла бы выучить распознающая сеть и обоснованно или необоснованно использовать при своей работе. Этот подход прост в реализации и легко адаптируется к различным языкам. При работе со случайными последовательностями можно дополнительно модифицировать распределение исходных символов на основе эвристик и экспертных знаний. Например, можно вместо равномерного распределения по всем символам использовать распределение с повышенными вероятностями знаков препинания. Такая эвристика базируется на том факте, что, например, в китайском языке средняя длина слова – два символа, однако если распределение символов оставить равномерным, то вероятность знака препинания будет меньше 10^{-4} , ведь иероглифов в китайском десятки тысяч. Также возможной эвристикой является ограничение на последова-

тельное написание символов определенных видов, например, запрет на чередование заглавных и прописных букв (строк вида «aAbBvV») или запрет на длинные последовательности знаков препинания. Однако всевозможные эвристики существенно осложняют систему генерации и могут меняться от языка к языку.

Второй подход – печать реальных текстов или слов, которые были бы на настоящих собранных данных для решаемой задачи [11-15]. В этом случае в данных обязательно присутствует языковая модель, которая будет выучена распознавателем. Использование языковой модели в сети имеет положительные и отрицательные эффекты. К положительным относится способность сети распознавать плохо видимые символы исходя из их соседей. В случае распознавания искаженных изображений такое свойство может быть полезным и соответствовать человеческому восприятию, ведь мы многие слова можем додумать. К отрицательным последствиям относится очень схожий эффект – сеть может «исправить» результат распознавания в редком или написанном с ошибкой слове. Также «исправления» могут происходить при перенесении сети между языками, использующими общую письменность [16]. Такое поведение особенно опасно при распознавании документов, удостоверяющих личность, ведь существует много, например, имен и фамилий, отличающихся одной буквой, но с существенно разной частотой встречи. Также такие сети плохо проявляют себя на строках, существенно отличающихся по своей структуре от обучающей выборке. Например, популярная открытая система распознавания Tesseract OCR 4 [17] использует LSTM-сеть и обучена на данных, взятых из языка (тексты книг, статей и т.д.) и показывает высокие результаты на аналогичных данных. Однако если попытаться ею распознать МЧЗ, снятые в аналогичных условиях и отличающиеся именно внутренней структурой текста, точность распознавания уменьшится [6].

Таким образом, для генерации хорошей последовательности символов система, с одной стороны, должна обладать гибкостью и возможностью создания почти случайных последовательностей, а с другой – сохранять отдельные свойства распределений символов и их кластеров. Стоит заметить, что в области обработки естественного языка (natural language processing) активно исследуются методы генерации текста на основе нейросетевых моделей [18]. Такие модели, умеющие создавать неотличимые от реальных тексты, обычно содержат десятки миллионов параметров [19] и требуют гигантских объемов данных для каждого языка.

Однако в нашей задаче нам не требуется большинство возможностей сетей, генерирующих текст, которые приводят к такому количеству параметров, т.е. нам не нужно сохранять семантические связи между полученными словами и не нужно гарантировать какое-либо верное написание слов и предложений. Фактически, нам нужен метод предсказания символа (или его кластера) на основе уже построенной последовательности.

2. Предсказывающая система

2.1 Описание системы

Предсказывающая система включает в себя несколько этапов, при этом ее основным элементом является полносверточная нейронная сеть (подробно описана в следующем разделе).

Перед началом описания системы введем следующие понятия и обозначения:

- 1) Класс – элемент целевого алфавита при генерации текста, например, буква «А».
- 2) Кластер – объединение классов, используемое в предсказывающей ИНС, например, «гласные буквы».
- 3) С – обозначение общего числа кластеров.
- 4) N – длина последовательности, подаваемой на вход предсказывающей ИНС.

Используемая ИНС принимает в качестве входных данных последовательность из N элементов, представленных в виде индексов кластеров. Соответственно, чтобы предсказать первые N-1 кластер, необходимо задать начальное состояние. Лучший вариант – это случайный выбор кластеров, независимо от их реалистичности. Такой подход позволяет нам генерировать более разнообразные данные. Случайно выбранные кластеры не будут включены в обучающие данные для распознавателя.

Далее ИНС на основе входа вычисляет распределение вероятностей кластеров. На основе вероятностей, вычисленных нейронной сетью, выбирается следующий кластер. Важно отметить, что мы не выбираем всегда кластер с наибольшей вероятностью, так как иначе мы получим много похожих и повторяющихся последовательностей символов.

Следующим шагом после выбора кластера является выбор класса (символа) из этого кластера, чтобы добавить его в результирующую строку. Выбор совершенно случаен, не зависит ни от каких ограничений.

Этапы алгоритма системы для генерации символьной последовательности продемонстриро-

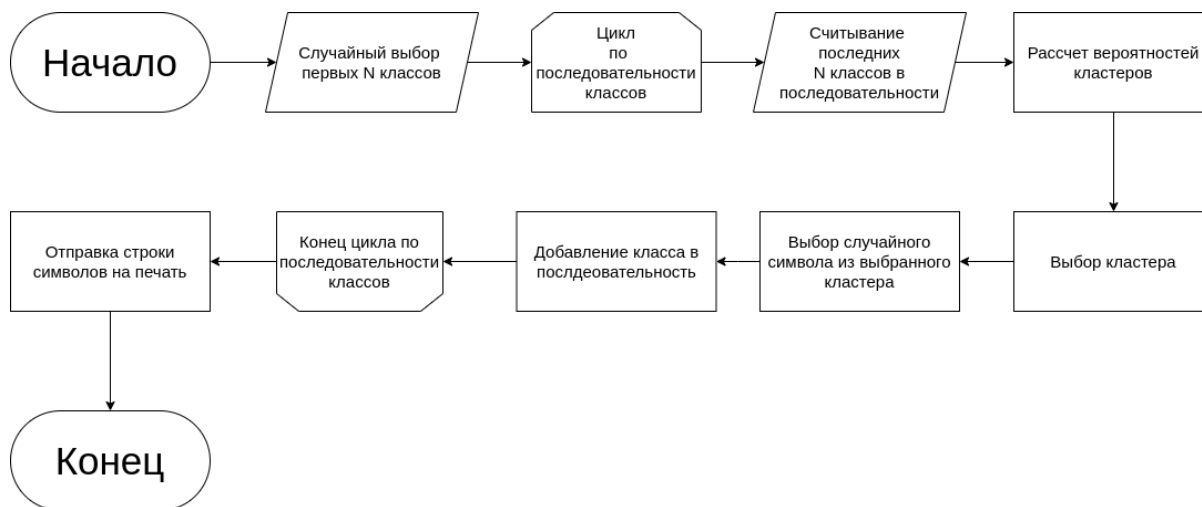


Рис. 2. Этапы работы предсказывающей системы

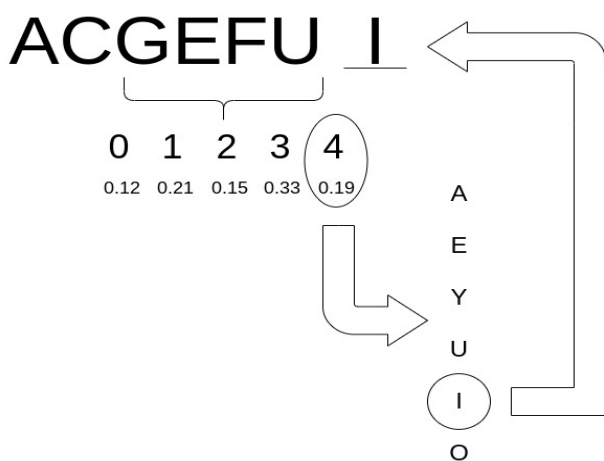


Рис. 3. Процесс предсказания символа (в случае $C = 5$, $N = 4$)

ваны на рис. 2. На рис. 3 показан процесс предсказания следующего класса на основе уже созданной строки.

2.2 Предсказывающая ИНС

Архитектура нейронной сети приведена в табл. 1. Архитектура нейронной сети состоит из сверточных слоев с функциями активации ReLU и rf [20]. Архитектура имеет вес $6,06 \times 10^3$.

Предсказывающая ИНС обучается на патчах. Каждый патч представляет собой слово из N символов вида $w = (s_1, \dots, s_{N-1}, s_N)$, где $s_{[1;N-1]}$ – вход нейронной сети, а s_N – предсказанный класс. Каждый символ в строке кодируется соответствующим кластером.

3. Эксперименты

3.1 Постановка экспериментов

В этой статье мы решили использовать поля МЧЗ [21] документов в качестве примеров по нескольким причинам: распознавание полей МЧЗ достигло более высоких значений по сравнению с распознаванием большинства других полей документа; в полях МЧЗ используются слова и цифры, но они не имеют сильных грамматических или семантических связей; МЧЗ имеет строго определенную структуру. Структура МЧЗ имеет некоторые особенности: в этих полях не допускаются знаки препинания, за исключением символа заполнения “<”; поля МЧЗ содержат только заглавные буквы; символы машиночитаемой зоны записываются с помощью шрифта OCR-B (по стандарту) или похожими шрифтами.

Чтобы сделать выводы о результатах распознавания, мы обучали три распознавателя с одина-

Табл. 1

Архитектура предсказывающей сети

Слои			
#	Тип	Функция активации	Параметры
1	Conv	ReLU	32 фильтра 4*1, шаг 1*1, без отступов
2	Conv	ReLU	32 фильтра 1*1, шаг 1*1, без отступов
3	Conv	ReLU	64 фильтра 4*1, шаг 1*1, без отступов
4	Conv	rf[1,1]	32 фильтра 1*1, шаг 1*1, без отступов
5	Conv	rf[1,1]	16 фильтров 1*1, шаг 1*1, без отступов
6		SoftMax	C выходов

ковой архитектурой ИНС, но на разных видах синтезированных данных:

- 1) Распознаватель NN обучался на данных, созданных с помощью предлагаемой предсказывающей системы, $C = 5$.
- 2) Распознаватель RC обучался на данных с полностью случайными последовательностями символов.
- 3) Распознаватель FA обучался на данных, созданных с помощью предсказывающей системы, где каждому символу, используемому в МЧЗ, соответствовал отдельный кластер, т.е. $C = 38$.

Также для анализа качества распознавания мы добавили к сравнению Tesseract 4.1.1 [17]. Это необходимо для сравнения наших результатов с базовым уровнем.

Чтобы оценить полученные результаты, мы вычисляем точность посимвольного распознавания по формуле:

$$PCR = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{L_{total}} \min(lev(l_{ideal}, l_{irecog}), len(l_{ideal}))}{\sum_{i=1}^{L_{total}} \min(len(l_{ideal}))} \right) * 100\%$$

где L_{total} – общее число строк в тестовой выборке; $len(l_{ideal})$ – длина i -ой строки из тестовой выборки; $lev(l_{ideal}, l_{irecog})$ – расстояние Левенштейна между распознанным текстом и аннотацией на i -строке.

3.2 Обучающие и тестовые данные

Для обучения предсказывающей ИНС использовались текстовые данные из открытого набора данных полей МЧЗ [22]. Общий размер набора данных составил 11 400 уникальных файлов. Количество строк МЧЗ в документе варьируется от 2 до 3. Общий объем данных для предсказывающей ИНС составляет примерно 10^6 обучающих примеров. Данные были разделены на обучающую и тестовую выборки в соотношении 90:10. Из-за очень небольшого размера каждого пакета обучение сети на них занимает короткий промежуток времени, несмотря на их большое количество. Благодаря этому не требуется использования больших вычислительных и временных ресурсов. Размер мини-батчей составляет 1024. Во время обучения аугментация данных не применялась. Чтобы получить наибольший объем обучающих данных, мы

используем каждые $(N-1)$ символа из результирующей строки со смещением 1 вместо использования непересекающихся уникальных подстрок. Принцип генерации данных для обучения показан на рис. 4. Объединение всех полей в одно устраняет необходимость объявлять начальные символы, чтобы начать генерацию для каждого поля. В первые N -позиций объединенной строки мы записываем пробелы. В наших экспериментах $N = 4$. Так как наша предсказывающая система работает с кластерами символов, для проведения эксперимента необходимо выделить кластеры для МЧЗ. В наших экспериментах $C = 5$ и выделены следующие кластеры:

- цифры (“0”, “1”, ..., “9”);
- знаки препинания (“<”, “>”);
- пробел (“ ”);
- заглавные согласные буквы (“B”, “C”, ..., “Z”);
- заглавные гласные буквы (“A”, “E”, ..., “Y”).

Несмотря на то, что в полях МЧЗ нет пробелов, их присутствие в обучающих данных для сети распознавания необходимо. Поскольку текстовая строка для распознавания обрезана только сверху и снизу, слева и справа от поля есть пустые места. Эти пустые места должны быть обнаружены и отнесены к классу, известному распознавателю. Если сеть не была обучена обнаруживать пробел, то она определит пустое пространство как какой-то другой класс. Это приведет к неправильному распознаванию поля или использованию дополнительной системы обрезки.

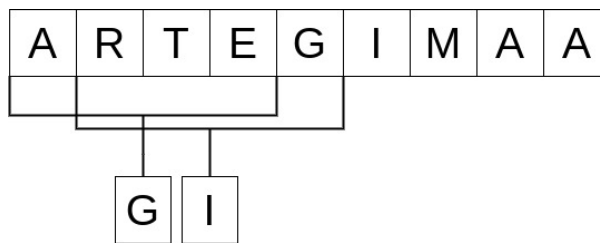


Рис. 4. Формирование обучающих данных ($N = 4$)

Для обучения распознавателя были созданы изображения с напечатанными на них последовательностями. На рис. 5 показано сравнение строк, созданных с помощью случайного выбора, с использованием предсказывающей системы с 5 кластерами и с предсказывающей системой с полным алфавитом (38 кластеров).

```

7M<F024SWH TD4W02 JUGT08E SS73AH Y<TEVZUYD<<EVAGC0<<VAHUYT<<<<C 0 IIL<0<2A1UZYS&lt;SIGMGTKA5CWSN<4KYUG
LXBRE1<1R U9<ME 0 8J D0X1BVY5 A<<<8<<<<P EFPAIXIUFZJ2866ZR7E3<A SUGWB5T<49<14FKWMM31<E7<KNEFEGIIAAQ<QPI
6IUB1G4 R97CFC TE0ED 8UH5QUCW L2<8W ANPKIZJA81J<<<<<M Y6BY8F <RKCHE16SY<LI6ID<E<<2DLZYXXTG1XRCAQOYASJ
IOECC<4 Q1ZDZY0Z RTNB7 EAZ3K 4U<<<<<<<6NGE5<<<<L H<3<<<<<<B AM W3D<AC<I<RAICXEAU5UE GD9EZR<<Y7L4A0A
FPGTBP1R H1J6M6RV8X YB2F5 <URFKI<<YKNY066<<3ZUB561I<<<<<Z UMJI <<QCFFEEIWR2FDTNNSVLSFIEK<HL8EWUQGWT61
91P9W MF951 6BA00KX PJM1ALJ820 AIUA<<AQSY<<<<<OZAPH<<9NAH7ZFQ<<<< D9AKICEFLIK<45TQCLJ<E7ABAWDMAEOIAS9P0VZ

```

Рис. 5. Сравнение сгенерированных данных без предсказывающей системы и на ее основе с 5 и 38 кластерами

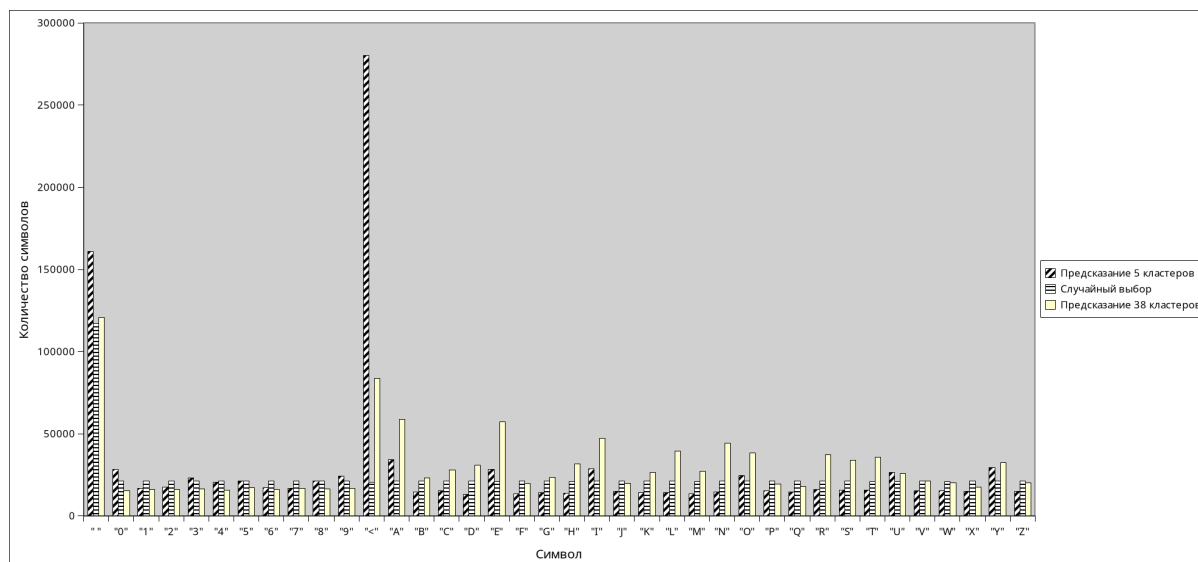


Рис. 6. Количество использований каждого символа в обучающих данных сети распознавания

Количество символов, создаваемых при генерации данных с использованием предсказывающей ИНС, значительно отличается от класса к классу. Количество сгенерированных символов в данных для обучения распознавателя показано на рис. 6.

Использование сети для генерации данных сократило количество пробелов на 60% по сравнению со случайным выбором символов. Напротив, количество символов-заполнителей “<” увеличилось почти в 13 раз. Каждая гласная встречается в строках почти в два раза чаще, чем согласная.

Для эксперимента мы выбрали три тестовых набора данных для оценки влияния предсказывающей нейронной сети на распознавание полей МЧЗ MIDV-500 [2], MIDV-2019 [23] и MIDV-LAIT [24]. Набор данных MLDV-500 включает цветные изображения документов, содержащих 5096 полей МЧЗ. Набор данных MIDV-2019 содержит в общей сложности 3600 строк МЧЗ. MIDV-LAIT включает в себя 72409 изображений документов, из которых можно извлечь 1400 уникальных строк МЧЗ.

3.3 Результаты эксперимента

Результаты распознавания для полей МЧЗ

приведены в табл. 2, где даны значения посимвольного качества распознавания:

- обученного на данных, созданных с использованием предсказывающей системы с $C = 5$ – PCR_{NN} ;
- обученного на данных, созданных с использованием случайного выбора символов – PCR_{RC} ;
- обученного на данных, созданных с использованием предсказывающей системы с $C = 38$, т.е. основанной на полном алфавите – PCR_{FA} ;
- Tesseract OCR 4.1.1.

Как мы можем видеть, PCR_{NN} – это наилучший результат для каждого тестового набора данных. Это указывает на положительное влияние использования предсказывающей системы на финальное распознавание.

Качество распознавания для PCR_{NN} выше в каждом из протестированных наборов данных. На MIDV-500 разница с PCR_{RC} составляет 0,69%, на MIDV-2019 – 2,27%, на MIDV-LAIT – 0,38%. Можно предположить, что в MIDV-2019 чаще не распознаются не последовательные символы, а отдельные, в то время как соседние распознаются правильно. Сеть, обученная на данных, сгенерированных случайным выбором символов, не может воспользоваться контекстом, окружающим

Табл.2

Результаты распознавания для МЧЗ

Набор изображений	Кол-во полей	Tesseract 4.1.1	PCR_{RC}	PCR_{FA}	PCR_{NN}
MIDV-500	5096	56.58	93.16	92.45	93.85
MIDV-2019	3600	45.35	88.08	88.34	90.35
MIDV-LAIT	1400	63.69	91.66	91.89	92.04

символ, поскольку она была обучена на случайно сгенерированном контексте и, следовательно, символ распознается неправильно. Нейронная сеть, обученная на данных, созданных с использованием предсказывающей ИНС, дополнительно использует преимущество обучения в аналогичном контексте при выдаче результата распознавания. Если сеть не уверена в выборе ответа, этот фактор может оказать решающее влияние. Такое низкое качество распознавания Tesseract OCR 4.1.1 можно объяснить тем фактом, что он обучался на данных, которые не содержали информации из полей МЧЗ. Это подчеркивает важность создания подходящих обучающих данных.

Заключение

Предложенный метод генерации последовательности символов для создания текстового заполнения синтезированных обучающих изображений позволяет увеличить репрезентативность обучающих данных, тем самым повышая качество итогового классификатора. Замеры качества распознавания МЧЗ на актуальных открытых наборах изображений подтверждает эффективность предложенной системы создания данных, показав рост качества на 5–20% в зависимости от используемого набора по сравнению с классификатором, обученным на случайных последовательностях символов. Таким образом, предложенная система предсказания символов показала свою полезность для текстовых полей с нестандартной моделью.

В будущих работах мы планируем применить данный подход для создания нейронной сети, способной генерировать последовательности символов для распознавания других полей документов, требующих иных правил генерации и расширенного алфавита.

Литература

1. Николаев Д.П., Полевой Д.В., Тарасова Н.А. Синтез обучающей выборки в задаче распознавания текста в трехмерном пространстве // ИТиВС. 2014. № 3. С. 82–88.
2. Arlazarov V.V., Bulatov K., Chernov T. and Arlazarov V. L. "MIDV-500: A dataset for identity document analysis and recognition on mobile devices in video stream," *Computer Optics* 43(5), 818–824 (2019). DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-5-818-824.
3. Naiemi F., Ghods V., Khalesi H. An efficient character recognition method using enhanced HOG for spam image detection, *Soft Computing*. 23 (2019)
4. Bulatov K., Arlazarov V. V., Chernov T., Slavin O., Nikolaev D. Smart IDReader: Document Recognition in Video Stream // *ICDAR 2017 / Manhattan, New York, U.S.: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (IEEE)*. 2017. Т. 6. С. 39–44. DOI: 10.1109/ICDAR.2017.347.
5. Arlazarov V.L., Arlazarov V.V., Bulatov K.B., Chernov T.S., Nikolaev D.P., Polevoy D.V., Sheshkus A.V., Skoryukina N.S., Slavin O.A., Usilin S.A. Mobile ID Document Recognition-Coarse-to-Fine Approach // *Pattern Recognit. Image Anal.* 2022. Т. 32. № 1. С. 89–108. DOI: 10.1134/S1054661822010023.
6. Chernyshova Y.S., Sheshkus A.V., Arlazarov V.V. Two-step CNN framework for text line recognition in camera-captured images // *IEEE Access*. 2020. Т. 8. С. 32587–32600. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2974051.
7. Jaderberg M., Simonyan K., Vedaldi A. and Zisserman A. "Synthetic data and artificial neural networks for natural scene text recognition," in *Workshop on Deep Learning, NIPS*. 2014.
8. Hula J., Mojzisek D., Adamczyk D. and Cech R. "Acquiring Custom OCR System with Minimal Manual Annotation," in *2020 IEEE Third International Conference on Data Stream Mining Processing (DSMP)*. 2020. P. 231–236.
9. Ren X., Chen K. and Sun J. "A CNN Based Scene Chinese Text Recognition Algorithm With Synthetic Data Engine," *CoRR abs/1604.01891*. 2016.
10. Chernyshova Y.S., Gayer A.V. and Sheshkus A.V. "Generation method of synthetic training data for mobile OCR system," in *ICMV 2017, A. Verikas, P. Radeva, D. Nikolaev, and J. Zhou, eds., 10696, 1–7, SPIE (Apr. 2018)*. DOI: 10.1117/12.2310119.
11. Krishnan P. and Jawahar C.V. "Generating Synthetic Data for Text Recognition," *CoRR abs/1608.04224*. 2016.
12. Liu Y., Wang Z., Jin H. and Wassell I. "Synthetically supervised feature learning for scene text recognition," in *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV)*. 2018. P. 435–451.
13. Schwarcz S., Gorban A., Serra X.G. and Lee D.-S. "Adapting Style and Content for Attended Text Sequence Recognition," in *2020 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*. 2020. 1586–1595 p.
14. Namysl M. and Konya I. "Efficient, Lexicon-Free OCR using Deep Learning," *2019 International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR)*. 2019. P. 295–301. DOI: 10.1109/ICDAR.2019.00055.
15. Jaderberg M., Simonyan K., Vedaldi A. and Zisserman A. "Synthetic Data and Artificial Neu-

- ral Networks for Natural Scene Text Recognition”, Workshop on Deep Learning, NIPS. 2014.
16. *Adnan Ul-Hasan and Thomas M. Breuel*. 2013. Can we build language-independent OCR using LSTM networks? In Proceedings of the 4th International Workshop on Multilingual OCR (MOCR '13). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 9, 1–5. <https://doi.org/10.1145/2505377.2505394>
17. “Tesseract OCR.” <https://github.com/tesseract-ocr/tesseract>. Online, Accessed: 11.08.2021.
18. *Touseef Iqbal, Shaima Qureshi*. The survey: Text generation models in deep learning, Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences, Volume 34, Issue 6, Part A. 2022. P. 2515-2528. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2020.04.001>.
19. *Radford A., Wu J., Child R., Luan D., Amodei D. and Sutskever I*. 2019. Language models are unsupervised multitask learners. OpenAI blog. 1(8). P. 9.
20. *Gayer A.V., Sheshkus A.V., Nikolaev D.P. and Arlazarov V.V.* “Improvement of U-Net Architecture for Image Binarization with Activation Functions Replacement,” in ICMV 2020, 11605, SPIE (Jan. 2021). DOI: 10.1117/12.2587027.
21. ICAO Doc 9303 Part 3: Specifications Common to all MRTDs, Machine Readable Travel Documents – International Civil Aviation Organization. 2015.
22. *A. Hartl, C. Arth, and D. Schmalstieg*. “Real-time Detection and Recognition of Machine-Readable Zones with Mobile Devices,” VISAPP 2015 – 10th International Conference on Computer Vision Theory and Applications; VISIGRAPP, Proceedings 3. 2015. P. 79–87.
23. *Bulatov K., Matalov D. and Arlazarov V.V.* “MIDV-2019: Challenges of the Modern Mobile-Based Document OCR,” in ICMV 2019, W. Osten, D. Nikolaev, and J. Zhou, eds., 11433, 1–6, SPIE (Jan. 2020). DOI: 10.1117/12.2558438.
24. *Chernyshova Y.S., Emelianova E.V., Sheshkus A.V. and Arlazarov V.V.* “MIDV-LAIT: a challenging dataset for recognition of IDs with Perso-Arabic, Thai, and Indian scripts,” in ICDAR. 2021. P. 1–15.

Злобин Павел Константинович. Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», г. Москва, Россия. Аспирант. Количество печатных работ: 1. Область научных интересов: информационные технологии, машинное обучение, анализ данных. E-mail: p.zlobin@smartengines.com

Чернышова Юлия Сергеевна. Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», г. Москва, Россия. Математик. Количество опубликованных работ: 15. Область научных интересов: синтез данных, оптическое распознавание символов и глубокие нейронные сети. E-mail: chernyshova@smartengines.com (Ответственный за переписку)

Шешкус Александр Владимирович. Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», г. Москва, Россия. Научный сотрудник. Количество печатных работ: более 50. Область научных интересов: глубокие нейронные сети, компьютерное зрение, проективно-инвариантная сегментация изображений. E-mail: asheshkus@smartengines.com

Арлазаров Владимир Викторович. Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», г. Москва, Россия. Заведующий отделом. Кандидат технических наук. Количество печатных работ: 130. Область научных интересов: искусственный интеллект, машинное обучение, системы распознавания, информационные технологии. E-mail: vva777@gmail.com

Neural network method for character sequence generation for text images training dataset synthesis

P.K. Zlobin^{I,II}, Y.S. Chernyshova^{I,II}, A.V. Sheshkus^{I,II}, V.V. Arlazarov^{I,II}

^I Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^{II} Smart Engines Service, LLC, Moscow, Russia

Abstract. The size of the training sample is an important factor in solving optical character recognition tasks. Notably, the majority of the research focuses on increasing the variety of distributions that are applied to the images. Yet the internal structure of the textual information also affects the accuracy of the resulting model. We propose a neural network based text generation method for the creation of a synthetic training dataset of images with annotations, in which we propose to operate with groups of characters – alphabetic clusters, and use the sequence of clusters to predict the following character. The proposed cluster approach allows us to create specific sequences that retain the main properties of the target language, but do not contain a full language model. Since the proposed method works on a small number of clusters, we can use a small training set and a light neural network to generate text. The results of experiments with three open datasets of identity document images demonstrate the effectiveness of our method and the possibility of improving modern results for target fields.

Keywords: training data, neural network, OCR, text generation, data synthesis

DOI: 10.14357/20790279230204

References

1. Nikolaev D.P., Polevoy D.V. and Tarasova N.A. "Sintez obuchayushey vyborki v zadache raspoznavaniya teksta v trekhmernom prostranstve," ITiVS (3), 82–88 (2014).
2. Arlazarov V.V., Bulatov K., Chernov T. and Arlazarov V.L. "MIDV-500: A dataset for identity document analysis and recognition on mobile devices in video stream," Computer Optics 43(5), 818–824 (2019). DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-5-818-824.
3. Naiemi F., Ghods V., Khalesi H. An efficient character recognition method using enhanced HOG for spam image detection, Soft Computing. 23 (2019)
4. Bulatov K., Arlazarov V.V., Chernov T., Slavin O., Nikolaev D. Smart IDReader: Document Recognition in Video Stream // ICDAR 2017 / Manhattan, New York, U.S.: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (IEEE). 2017. T. 6. C. 39-44. DOI: 10.1109/ICDAR.2017.347.
5. Arlazarov V.L., Arlazarov V.V., Bulatov K.B., Chernov T.S., Nikolaev D.P., Polevoy D.V., Sheshkus A.V., Skoryukina N.S., Slavin O.A., Usilin S.A. Mobile ID Document Recognition-Coarse-to-Fine Approach // Pattern Recognit. Image Anal. 2022. T. 32. № 1. C. 89-108. DOI: 10.1134/S1054661822010023.
6. Chernyshova Y.S., Sheshkus A.V., Arlazarov V.V. Two-step CNN framework for text line recognition in camera-captured images // IEEE Access. 2020. T. 8. C. 32587-32600. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2974051.
7. Jaderberg M., Simonyan K., Vedaldi A. and Zisserman A. "Synthetic data and artificial neural networks for natural scene text recognition," in Workshop on Deep Learning, NIPS. 2014.
8. Hula J., Mojzisek D., Adamczyk D. and Cech R. "Acquiring Custom OCR System with Minimal Manual Annotation," in 2020 IEEE Third International Conference on Data Stream Mining Processing (DSMP). 2020. P. 231–236.
9. Ren X., Chen K. and Sun J. "A CNN Based Scene Chinese Text Recognition Algorithm With Synthetic Data Engine," CoRR abs/1604.01891. 2016.
10. Chernyshova Y.S., Gayer A.V. and Sheshkus A.V. "Generation method of synthetic training data for mobile OCR system," in ICMV 2017, A. Verikas, P. Radeva, D. Nikolaev, and J. Zhou, eds., 10696, 1–7, SPIE (Apr. 2018). DOI: 10.1117/12.2310119.
11. Krishnan P. and Jawahar C.V. "Generating Synthetic Data for Text Recognition," CoRR abs/1608.04224. 2016.
12. Liu Y., Wang Z., Jin H. and Wassell I. "Synthetically supervised feature learning for scene text recognition," in Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV). 2018. P. 435–451.
13. Schwarcz S., Gorban A., Serra X.G. and Lee D.-S. "Adapting Style and Content for Attended Text Sequence Recognition," in 2020 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV). 2020. 1586–1595 p.
14. Namysl M. and Konya I. "Efficient, Lexicon-Free OCR using Deep Learning," 2019 International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR). 2019. P. 295-301. DOI: 10.1109/ICDAR.2019.00055.

15. *Jaderberg M., Simonyan K., Vedaldi A. and Zisserman A.* “Synthetic Data and Artificial Neural Networks for Natural Scene Text Recognition”, Workshop on Deep Learning, NIPS. 2014.
16. *Adnan Ul-Hasan and Thomas M. Breuel.* 2013. Can we build language-independent OCR using LSTM networks? In Proceedings of the 4th International Workshop on Multilingual OCR (MOCR ‘13). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 9, 1–5. <https://doi.org/10.1145/2505377.2505394>
17. “Tesseract OCR.” <https://github.com/tesseract-ocr/tesseract>. Online, Accessed: 11.08.2021.
18. *Touseef Iqbal, Shaima Qureshi.* The survey: Text generation models in deep learning, Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences, Volume 34, Issue 6, Part A. 2022. P. 2515-2528. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2020.04.001>.
19. *Radford A., Wu J., Child R., Luan D., Amodei D. and Sutskever I.* 2019. Language models are unsupervised multitask learners. OpenAI blog. 1(8). P. 9.
20. *Gayer A.V., Sheshkus A.V., Nikolaev D.P. and Arlazarov V.V.* “Improvement of U-Net Architecture for Image Binarization with Activation Functions Replacement,” in ICMV 2020, 11605, SPIE (Jan. 2021). DOI: 10.1117/12.2587027.
21. ICAO Doc 9303 Part 3: Specifications Common to all MRTDs, Machine Readable Travel Documents – International Civil Aviation Organization. 2015.
22. *A. Hartl, C. Arth, and D. Schmalstieg.* “Real-time Detection and Recognition of Machine-Readable Zones with Mobile Devices,” VISAPP 2015 – 10th International Conference on Computer Vision Theory and Applications; VISIGRAPP, Proceedings 3. 2015. P. 79–87.
23. *Bulatov K., Matalov D. and Arlazarov V.V.* “MIDV-2019: Challenges of the Modern Mobile-Based Document OCR,” in ICMV 2019, W. Osten, D. Nikolaev, and J. Zhou, eds., 11433, 1–6, SPIE (Jan. 2020). DOI: 10.1117/12.2558438.
24. *Chernyshova Y.S., Emelianova E.V., Sheshkus A.V. and Arlazarov V.V.* “MIDV-LAIT: a challenging dataset for recognition of IDs with Perso-Arabic, Thai, and Indian scripts,” in ICDAR. 2021. P. 1–15.

P.K. Zlobin. PhD student, Institute for Systems Analysis Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, 44/2 Vavilova str., Moscow, 119333, Russia. he has published 1 paper. His research interests are IT, machine learning, and data analysis. E-mail: p.zlobin@smartengines.com

Y.S. Chernyshova. Mathematician, Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, 44/2 Vavilova str., Moscow, 119333, Russia. Number of papers: 15. Her research interests include training data synthesis, optical character recognition and deep neural networks. E-mail: chernyshova@smartengines.com (Corresponding author)

A.V. Sheshkus. Researcher, Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, 44/2 Vavilova str., Moscow, 119333, Russia. He has more than 50 published papers. His research interests include deep neural networks, computer vision, and projective invariant image segmentation. E-mail: asheshkus@smartengines.com

V.V. Arlazarov. Head of the Department for the Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. PhD. Number of articles: 130. Research interests: artificial intelligence, machine learning, recognition systems, information technology, queueing theory. E-mail: vva777@gmail.com

Сферические ограничения в триплетной функции потерь*

К.К. Сулоев^{II}, А.В. Шешкус^{I,II}, В.Л. Арлазаров^I

^I Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», г. Москва, Россия

^{II} ООО «Smart Engines Service», г. Москва, Россия

Аннотация. Обучение с триплетной функцией потерь – один из самых распространенных подходов в метрическом обучении. Оно находит свое применение в задачах сравнения изображений, идентификации, кодировании и др. Однако триплетная функция потерь обладает рядом недостатков, которые могут негативно сказываться на качестве, например таких, как склонность сети к застреванию в локальных минимумах и формирование тривиальных триплетов. В данной работе предлагается геометрический подход по улучшению качества, основанный на введении дополнительного слагаемого в функцию потерь. Изменение траектории достигается за счет перенаправления решенных и нерешенных изображений к поверхностям двух концентрических гиперсфер разного радиуса. Применение данного метода способствует уменьшению расстояний между изображениями одного класса. Предложенный метод не препятствует использованию других модификаций функции потерь. Экспериментально показано, что предложенный подход позволяет уменьшить часть нерешенных триплетов и далеких пар изображений одного класса.

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, метрическое обучение.

DOI: 10.14357/20790279230205

Введение

Метрическое обучение – популярный и перспективный в последнее время способ обучения искусственных нейронных сетей. При таком подходе модель глубокого обучения должна преобразовывать изображения в числовой вектор, содержащий информацию об исходном изображении.

Метрическое обучение находит свое применение во многих задачах компьютерного зрения, таких как идентификация [17], сегментация [7], распознавание текста [8], классификация [2, 11] и поиск структурных элементов [16]. Этот подход, в основном, может быть реализован двумя способами. Первый способ – использование *контрастной* функции потерь [6]. При ее использовании векторные представления изображений из одного класса должны притягиваться друг к другу, а векторные представления изображений из разных классов – отталкиваться. Недостаток данного подхода заключается в том, что при обучении с контрастной функцией потерь, векторы из разных классов долж-

ны отстоять друг от друга не меньше, чем на фиксированное расстояние, что накладывает сильные ограничения на процесс обучения. Естественным развитием данной технологии, исправляющей эти недостатки, стала *триплетная* функция потерь (1). При таком подходе формируются тройки изображений – *триплеты*, состоящие из якоря, позитивного и негативного изображений. Цель обучения – минимизация расстояния между векторными представлениями якоря и позитивного изображения, а так же максимизация расстояния между векторными представлениями якоря и негативного изображения [9]. Триплет будет считаться решенным, если расстояние между якорем и позитивным изображением не менее чем на значение порога m меньше, чем между якорем и негативным изображением:

$$L_{\text{triplet}} = \max(|f(A) - f(P)|_2^2 - |f(A) - f(N)|_2^2 + m, 0). \quad (1)$$

Во время обучения такой сети изначальные векторные представления изменяются: происходит их движение по сложным траекториям. Векторные

* Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект номер 23-21-00524).

представления изображений одного класса двигаются ближе друг к другу, формируя кластеры, а векторы других классов отдаляются от них. Разброс расстояний между элементами одного класса характеризуется *внутриклассовой* дисперсией, а разброс расстояний между элементами разных классов – *межклассовой* дисперсией. Показатель качества сформировавшихся структур векторных представлений – низкие значения внутриклассовой и высокие значения межклассовой дисперсий.

Однако [1, 17, 9] показывают, что триплетная функция потерь обладает рядом недостатков. Известно [17, 19], что применение триплетной функции потерь без дополнительных модификаций не позволяет получить максимально возможное качество, так как при обучении сеть склонна к застреванию в локальных минимумах. Одна из причин такого поведения заключается в том, что сеть очень быстро обучается корректно решать *тривиальные* триплеты, отчего большая часть данных становится неинформативной [1, 4, 9, 15].

Еще одна из проблем метрического обучения заключается в том, что расстояние между *центроидами* (усредненные векторы всех элементов класса) соседних классов в результирующем пространстве оказывается меньше, чем расстояние между элементами одного класса. Большие значения внутриклассовой дисперсии и малые расстояния между центроидами разных классов вредят точности дальнейшей классификации [12].

В силу того, что не существует однозначно эффективного способа улучшения качества сети с триплетной функции потерь, это улучшение достигается путем введения дополнительных модификаций и комбинаций уже имеющихся. Одно из направлений для модифицирования – выбор стратегии по генерации триплетов. Рассмотрим некоторые из них.

В работе [9] авторы одними из первых применили триплетную функцию потерь для задачи идентификации лиц. Ими также был предложен подход по формированию триплетов со сложным негативным примером. Предложенный ими метод позволяет исключить из обучения неинформативные *тривиальные* триплеты.

В той же работе отмечено, что формирование самых *сложных* триплетов приводит к застреванию сети в локальном минимуме, или *коллапсу*, поэтому был предложен подход по добыче триплетов умеренной сложности (рис. 1). В результате было получено ускорение процесса обучения, а также улучшение качества идентификации лиц.

Авторы [13] предлагают более эффективный способ формирования триплетов, основанный на

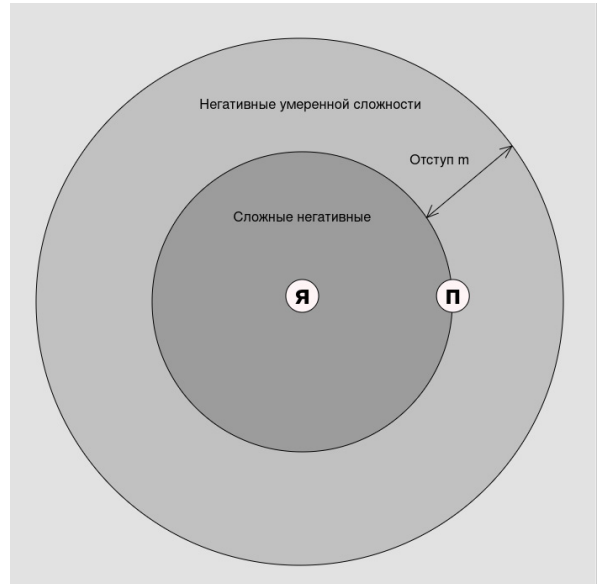


Рис. 1. Типы триплетов

алгоритме ранжирования и вычисления релевантности изображения. Релевантность конкретного изображения вычисляется, как сумма расстояний до всех изображений данного класса. Предложенный авторами подход также вводит концепцию *внеклассового* негативного примера (пример из отличного от якоря класса) и *внутриклассового* негативного примера (пример из того же класса, что и якорь, но обладающий низким значением релевантности). Хотя предложенный подход и помогает увеличить точность ранжирования изображений, он оказывается неприменим для других задач, в частности, в задаче идентификации. При таком подходе возможна ситуация, когда расстояние между изображениями одного класса в процессе обучения будет увеличено. Это сильно затрудняет последующую кластеризацию таких векторных представлений.

В работе [4] при обучении был применен итерационный процесс, на каждой итерации которого человек выбирал неверно классифицированные изображения. Таким образом формировалась выборка сложных негативных примеров. В результате был получен большой прирост в качестве итоговой классификации. К недостаткам данного подхода можно отнести невозможность разметки данных человеком, не имеющим опыта в данной области, а также ограниченную производительность человека и большие временные затраты.

Второе направление для модификаций – изменение непосредственно функции потерь. При введении модификаций, аналогично генерации триплетов, борются с тривиальными триплетными, порождающими нулевой градиент, а также с застреваниями сети в локальных минимумах.

Авторы [18] пытаются решить проблему большой внутриклассовой дисперсии. Предлагается ввести адаптивный порог $m_{adaptive}$, зависящий от входных данных. Таким образом при обучении учитывается влияние тех триплетов, которые при фиксированном пороге являлись бы решенными. Данный метод позволяет снизить внутриклассовую дисперсию.

Решение проблемы малых расстояний между центрами соседних классов предлагают в работе [3]. При обучении к триплету добавляется еще один негативный пример, что формирует *квадруплет*. Авторы показывают, что такой подход позволяет увеличить расстояние между центроидами разных классов.

В работе [14] авторы предлагают использовать введенную ими *центроидную* триплетную функцию потерь. Вместо вычисления расстояния между якорем, позитивным и негативным примерами, вычисляется расстояние между якорем и центроидами соответствующих классов.

Важно также отметить, что при изменении векторного представления изображения в процессе обучения возможна ситуация, когда его траектория движения лежит через уже сформированные структуры, относящиеся к другим классам. Из-за отталкивания между элементами различных классов эти структуры могут быть разрушены, либо препятствовать перемещению рассматриваемого примера в нужную позицию. Это повышает вероятность застревания сети в локальном минимуме.

В данной работе предложен геометрический метод по стабилизации обучения нейронной сети с триплетной функцией потерь путем введения сферических ограничений. Суть предложенного метода заключается в корректировании траекторий движений векторных представлений изображений при обновлении весов нейронной сети. Предлагаемые ограничения разделяют изображения, векторные представления которых уже разведены на необходимую дистанцию от тех, которые еще не являются решенными, по поверхностям двух гиперсфер разных радиусов. Предложенный подход реализован путем введения дополнительного слагаемого и не противоречит другим модификациям триплетной функции потерь, описанным выше.

1. Постановка задачи

Рассматривается обучение сети с триплетной функцией потерь. На рис. 2 схематически изображена траектория движения векторного представления изображения класса “1” в процессе обучения. Цель обучения – перенести объект класса “1” в об-

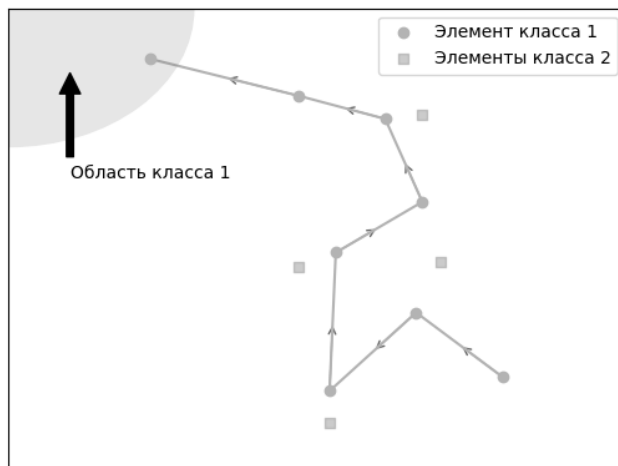


Рис. 2. Движение векторного представления изображения при использовании триплетной функции потерь

ласть, где содержатся другие объекты класса “1”. Можно видеть, что траектория движения объекта пролегает через область с объектами класса “2”. При прохождении через эту область объект класса “1” может получить градиент, направленный противоположно этой области. Это может замедлить процесс обучения и привести к застреванию сети в локальных минимумах.

Таким образом, задача разрабатываемого метода заключается в построении такой траектории движения векторного представления изображения, которая бы не пролегла (минимизировала бы путь) через уже устоявшиеся кластеры решенных изображений. Предложенный в работе подход будет протестирован при обучении сети. Ожидается, что итоговые и промежуточные (в процессе обучения) векторные представления изображений будут удовлетворять предложенным в работе геометрическим ограничениям, что приведет к улучшению качества сети.

2. Описание подхода

Будем называть триплет из якоря, позитивного и негативного примеров *решенным*, если для него оказался выполнен критерий, то есть расстояние до позитивного примера не менее, чем на m меньше, чем расстояние до негативного примера, иначе триплет становится *нерешенным*. Зафиксируем в результирующем пространстве две гиперсферы с радиусами r_0 и r_1 . Будем сдвигать решенные триплеты к гиперсфере с большим радиусом, а нерешенные триплеты – с меньшим радиусом. Такой порядок выбран в силу того, что для решенных примеров предполагается больший объем пространства, в котором они могут находиться. Та-

кого эффекта можно достичь, добавив *позиционное* слагаемое в функцию потерь:

$$L = L_{triplet} + q \cdot |f(A)|_2(|f(A)|_2 - r) + q \cdot |f(P)|_2(|f(P)|_2 - r) \quad (2)$$

$$(q, r) = \begin{cases} (q_0, r_0), & \text{если триплет решен} \\ (q_1, r_1), & \text{если триплет не решен} \end{cases} \quad (3)$$

В данном выражении r принимается равным r_0 или r_1 в зависимости от того, решен триплет или нет. Константа q , отвечающая силе притяжения к одной из двух сфер, выбирается, соответственно, равной q_0 или q_1 . Соответственно, если триплет является решенным, то он получает штраф за отдаленность от сферы r_0 . Проанализируем прибавку к градиентам, возникающую вследствие добавления дополнительного слагаемого (4):

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial f(A)} &= (f(N) - f(P)) + q \left(f(A) - \frac{f(A) \cdot r}{|f(A)|_2} \right); \\ \frac{\partial L}{\partial f(P)} &= (f(P) - f(A)) + q \left(f(P) - \frac{f(P) \cdot r}{|f(P)|_2} \right); \\ \frac{\partial L}{\partial f(N)} &= f(A) - f(N). \end{aligned} \quad (4)$$

Можно видеть, что каждый элемент получает дополнительный градиент по направлению к одной из двух гиперсфер в зависимости от того, решен ли триплет, в котором он находится.

Желаемая траектория движения элемента при обучении упрощенно проиллюстрирована на рис. 3. Предлагаемые сферические ограничения изменяют путь векторного представления изображения так, чтобы он не пролегал через устоявшиеся области других классов.

3. Эксперименты

3.1 Данные

Используется набор данных, содержащий в себе изображения различной внутренней природы

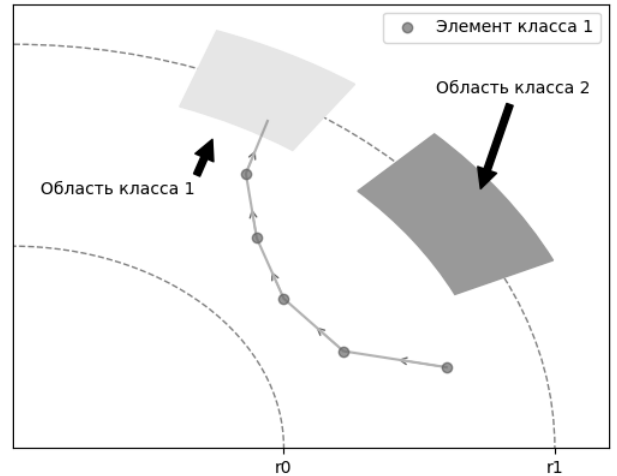


Рис. 3. Траектория движения векторного представления изображения при обучении со сферическими ограничениями



Рис. 4. Пример генерируемого триплета

[10]. Основной массив данных – геометрические структуры и отрывки текста под разными углами. Для формирования обучающей выборки из набора изображений были выбраны 2000 классов с наибольшим числом представителей. Итоговая выборка состоит из 8400 изображений. Размер всех изображений фиксирован – одноканальные изображения размером 32 на 32. Во время обучения используется стратегия генерации случайных триплетов на лету. Пример получаемого триплета изображен на рис. 4. Ввиду малого количества

Табл. 1

Архитектура нейронной сети

#	Слой	Параметры	Функция активации	Размер выхода
	Input	-	-	32x32x1
1	Conv	8 фильтров 4x4, шаг 2x2, без отступа	symrelu[1]	15x15x8
2	Conv	8 фильтров 3x1, шаг 1x1, без отступа	symrelu[1]	13x15x8
3	Conv	8 фильтров 1x3, шаг 1x1, без отступа	symrelu[1]	13x13x8
4	Conv	20 фильтров 3x3, шаг 2x2, без отступа	symrelu[1]	6x6x20
5	Conv	16 фильтров 4x4, шаг 1x1, без отступа	symrelu[1]	6x6x16
6	Conv	12 фильтров 4x4, шаг 1x1, без отступа	symrelu[1]	6x6x12
7	Conv	20 фильтров 4x4, шаг 1x1, без отступа	symrelu[1]	5x5x20
8	Conv	48 фильтров 3x3, шаг 2x2, без отступа	symrelu[1]	2x2x48
9	FC	Выход 128	symrelu[1]	1x1x128
10	FC	Выход d	-	1x1xd

данных, а также для расширения вариативности в ходе обучения к изображениям применяется аугментация *на лету* [5], включающая в себя шум, изменение интенсивности, размытие и проективные искажения.

3.2 Архитектура

В качестве архитектуры выбрана сверточная нейронная сеть. Архитектура нейронной сети аналогична [10] и представлена на табл. 1. В качестве функции активации используется пороговая функция:

$$\text{symrelu}(x) = \min(u, \max(l, x))$$

Размер векторного представления регулируется канальностью последнего слоя.

Выбранная архитектура отличается крайне малым числом параметров – $3.9 \cdot 10^4$. Она была применена в работе [10] для получения векторных представлений изображений.

Для проведения экспериментов используется сеть с размером векторного представления $d = 16$. Также, для возможности визуализации работы сферических ограничений дополнительно используется сеть с размером представления $d = 3$. Рассматривается сеть с триплетной функцией потерь, а также сеть с предложенной модификацией. В каждом из экспериментов был зафиксирован порог $m = 2.25$. Для модифицированной функции потерь также выбраны параметры $r_0 = 10, r_1 = 1, q_0 = 0.1, q_1 = 0.1$. Обучение производится на протяжении 150 эпох методом стохастического градиентного спуска со скоростью обучения и моментом $\text{lr} = 0.0004, \text{momentum} = 0.99$.

3.3 Влияние предложенной модификации на обучение

Рассмотрим влияние выбранного подхода на процесс обучения. Рис. 5 иллюстрирует характеристики сети на тестовом наборе данных в зависимости от эпохи для сети с размером выхода равным 16.

Верхний график на рисунке показывает значение функции ошибки на тестовом множестве для сети с модификацией и без. Можно видеть, что глубина и скорость сходимости при добавлении модификации не изменяются.

Средний график на рис. 5 позволяет увидеть, что часть неразрешенных триплетов, для которых значение функции потерь L_{triplet} оказалось не нулевым, уменьшилось.

Проанализируем нижний график на рисунке. Назовем пару элементов одного класса *далекими*, если расстояние между их векторными представлениями больше $m/2$. Далекие пары увеличивают

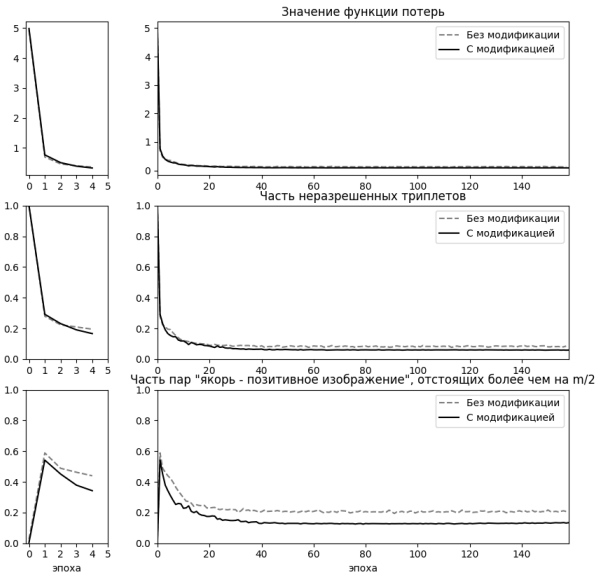


Рис. 5. Характеристики сети с размерностью выхода d=16

внутриклассовую дисперсию. Изначально данный показатель равняется нулю в силу того, что векторные представления всех изображений находятся в небольшой окрестности одной точки. Можно заметить, что при использовании сферических ограничений значения этого показателя оказываются ниже, чем при обучении без модификации. Это значит, что элементы одного класса при таком подходе будут расположены ближе, что положительно скажется на уменьшении внутриклассовой дисперсии.

Итоговые результаты занесены в табл. 2.

Табл. 2

Замеры итоговых метрик		
Показатель	Часть нерешенных триплетов	Часть далеких пар
Без модификации	0.075	0.193
С модификацией	0.055	0.124

Эксперимент показывает, что использование предложенной модификации помогает снизить часть нерешенных триплетов на 27%, а часть далеких пар – на 35%.

3.4 Распределение центроидов

Центроид класса – усреднение векторных представлений всех его представителей с учетом аугментации. Центроиды классов используются при дальнейшей классификации. На Рис. 6 приведены распределения центроидов для каждого из 2000 классов для триплетной функции потерь без модификации (верхняя линия) и с предложенными сферическими ограничениями (нижняя линия). Из графиков можно видеть процесс распро-

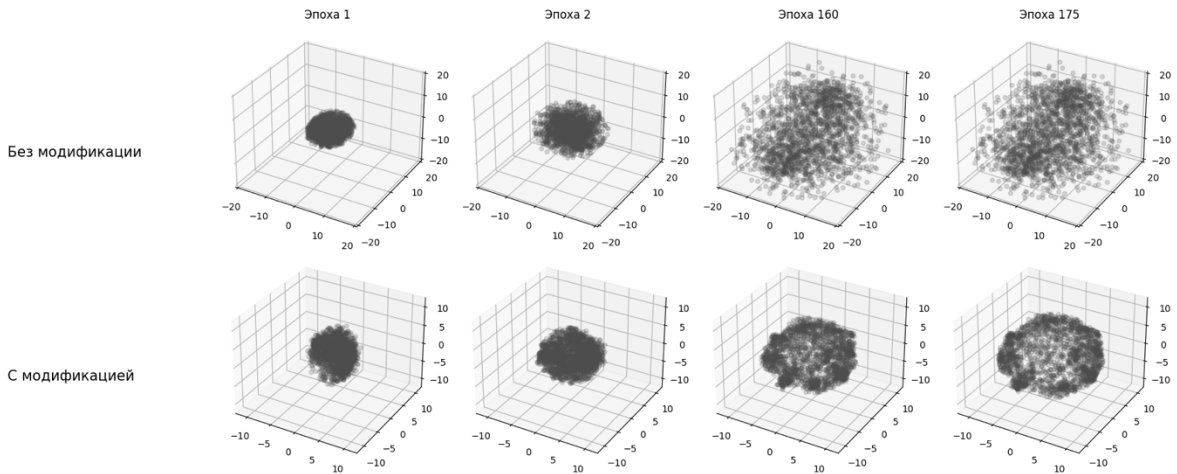


Рис. 6. Распределение центроидов в процессе обучения

странения центроидов по пространству в разные этапы обучения. При обучении со сферическими ограничениями сфера формируется постепенно: первоначально центроиды собираются около сферы меньшего радиуса. Далее в процессе обучения центроиды постепенно движутся по направлению большей сферы в силу того, что элементы соответствующих классов оказываются решенными. Данный эксперимент позволяет подтвердить, что траектории элементов на пути к своему финальному положению пролегают через меньшую сферу, не затрагивая уже сформировавшиеся структуры на большей сфере.

3.5 Траектории движения центроидов

Для подтверждения выдвинутой гипотезы о траекториях, исследуем положения центроидов относительно центра координат в процессе обучения. График рис. 7 иллюстрирует сравнение максимального, минимального и среднего расстояния от центра на каждой эпохе обучения для сети с модификацией и без. Из верхнего графика можно видеть, что при обучении сети без модификации, изменение положений элементов достигается, в основном, за счет отдаления от центра.

При обучении с модификацией (нижний график на рис. 7), простые для решения классы быстро выталкиваются на поверхность сферы. Можно заметить, что при обучении с модификацией, минимальное расстояние имеет гораздо более заметные локальные минимумы. Это связано с тем, что при необходимости переместить элементы некоторого класса, они получают градиент, направленный внутрь, и сдвигаются ближе к центру. Таким образом, элементы занимают свои позиции, не разрушая уже сформировавшиеся структуры для других классов.

3.6 Движение между сферами

Для демонстрации работы предложенного подхода зафиксируем эпоху обучения, когда сфера уже сформирована. Увеличим порог m до 3.5. При таком изменении часть решенных триплетов станут нерешенными, а следовательно, получат градиент по направлению к сфере радиуса r_1 . При дальнейшем обучении сети с таким параметром m часть триплетов снова становится решенными и получает градиент по направлению к сфере r_0 . Через некоторое количество эпох преобладающее количество триплетов будут решены и можно наблюдать исходную картину. Этот процесс продемонстрирован на рис. 8

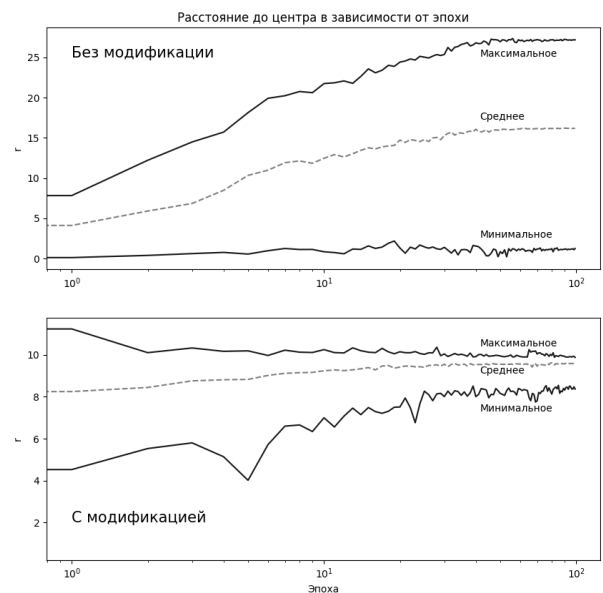


Рис. 7. Зависимость расстояния до центра от этапа обучения

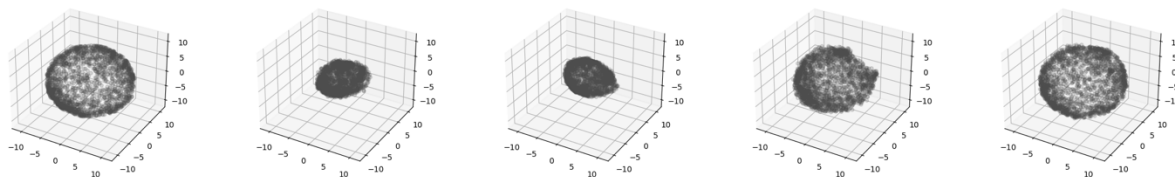


Рис. 8. Формирование малой сферы и ее эволюция

Данный эксперимент позволяет подтвердить выдвинутую ранее гипотезу о траекториях векторных представлений изображений.

Заключение

В данной работе предложен подход по модификации триплетной функции потерь, который корректирует траектории движения векторных представлений изображений в процессе обучения. Данный метод допускает его использование вкупе с другими модификациями, основанными на модификации функции потерь и стратегии генерации триплетов. Замеры показывают, что использование сферических ограничений приводит к уменьшению части нерешенных триплетов, а также к уменьшению части далеких пар изображений.

В дальнейшей работе предполагается исследовать зависимость между параметрами задачи и радиусами выбираемых гиперсфер.

Литература

1. Alnissany Alaa and Yazan Dayoub. *Modified Centroid Triplet Loss for Person Re-Identification*. Research Square Platform LLC, 31 Mar. 2022, <http://dx.doi.org/10.21203/rs.3.rs-1501673/v1>. Accessed 21 Feb. 2023.
2. Bucher Maxime, et al. "Improving Semantic Embedding Consistency by Metric Learning for Zero-Shot Classification." *Computer Vision – ECCV 2016*, Springer International Publishing, 2016, pp. 730–46, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-46454-1_44. Accessed 9 Mar. 2023.
3. Chen Weihua et al. "Beyond Triplet Loss: A Deep Quadruplet Network for Person Re-Identification." *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, IEEE, 2017, <http://dx.doi.org/10.1109/cvpr.2017.145>. Accessed 22 Feb. 2023.
4. Cui Yin et al. "Fine-Grained Categorization and Dataset Bootstrapping Using Deep Metric Learning with Humans in the Loop." *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, IEEE, 2016. <http://dx.doi.org/10.1109/cvpr.2016.130>. Accessed 27 Feb. 2023.
5. Gayer Alexander et al. "Effective Real-Time Augmentation of Training Dataset for the Neural Networks Learning." *Eleventh International Conference on Machine Vision (ICMV 2018)*, SPIE, 2019, <http://dx.doi.org/10.1117/12.2522969>. Accessed 21 Feb. 2023.
6. Hadsell R. et al. "Dimensionality Reduction by Learning an Invariant Mapping." *2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition – Volume 2 (CVPR'06)*, IEEE, <http://dx.doi.org/10.1109/cvpr.2006.100>. Accessed 24 Mar. 2023.
7. Min Zhu and Zhang Chongyang. "Few-Shot Object Detection via Metric Learning." *Fourteenth International Conference on Machine Vision (ICMV 2021)*, SPIE, 2022, <http://dx.doi.org/10.1117/12.2622909>. Accessed 24 Mar. 2023.
8. Mokin Arseniy et al. "Auto-Clustering Pairs Generation Method for Siamese Neural Networks Training." *Fourteenth International Conference on Machine Vision (ICMV 2021)*, SPIE, 2022, <http://dx.doi.org/10.1117/12.2623139>. Accessed 24 Mar. 2023.
9. Schroff Florian et al. "FaceNet: A Unified Embedding for Face Recognition and Clustering." *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, IEEE, 2015, <http://dx.doi.org/10.1109/cvpr.2015.7298682>. Accessed 21 Feb. 2023.
10. Sheshkus A. et al. "Tiny CNN for Feature Point Description for Document Analysis: Approach and Dataset." *Computer Optics*, vol. 46, no. 3, June 2022, <https://doi.org/10.18287/2412-6179-co-1016>.
11. Uzhinskiy A.V. et al. "One-Shot Learning with Triplet Loss for Vegetation Classification Tasks." *Computer Optics*, vol. 45, no. 4, Aug. 2021, <https://doi.org/10.18287/2412-6179-co-856>.
12. Venkataramanan Aishwarya et al. "Tackling Inter-Class Similarity and Intra-Class Variance for Microscopic Image-Based Classification." *Lecture Notes in Computer Science*, Springer International Publishing, 2021, pp. 93–103, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-87156-7_8. Accessed 21 Feb. 2023.

13. Wang Jiang et al. "Learning Fine-Grained Image Similarity with Deep Ranking." *2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE, 2014, <http://dx.doi.org/10.1109/cvpr.2014.180>. Accessed 27 Feb. 2023.
14. Wiecek Mikolaj et al. "On the Unreasonable Effectiveness of Centroids in Image Retrieval." *Neural Information Processing*, Springer International Publishing, 2021, pp. 212–23, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-92273-3_18. Accessed 22 Feb. 2023.
15. Wu Chao-Yuan et al. "Sampling Matters in Deep Embedding Learning." *2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, IEEE, 2017, <http://dx.doi.org/10.1109/iccv.2017.309>. Accessed 22 Feb. 2023.
16. Славин О.А. Применение дескрипторов объектов для привязки структурных элементов зашумленных образов деловых документов // ИТиВС. 2022. № 4. С. 13–24. DOI: 10.14357/20718632220402.
17. Hermans Alexander, Lucas Beyer and Bastian Leibe. "In defense of the triplet loss for person re-identification." arXiv preprint arXiv:1703.07737 (2017).
18. Ha Mai Lan and Volker Blanz. "Deep ranking with adaptive margin triplet loss." arXiv preprint arXiv:2107.06187 (2021).
19. Xu Albert et al. "Mathematical Justification of Hard Negative Mining via Isometric Approximation Theorem." arXiv preprint arXiv:2210.11173. 2022.

Сулоев Константин Константинович. ООО «Smart Engines Service», г. Москва, Россия. Программист-лаборант. Область научных интересов: глубокие нейронные сети, компьютерное зрение, генеративные нейронные сети. E-mail: k.suloev@smartengines.com (Ответственный за переписку).

Шешкус Александр Владимирович. Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», г. Москва, Россия. Научный сотрудник. Количество печатных работ: более 50. Область научных интересов: глубокие нейронные сети, компьютерное зрение, проективно инвариантная сегментация изображений. E-mail: astdcall@gmail.com

Арлазаров Владимир Львович. Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», г. Москва, Россия. Заведующий отделением. Чл.–корр. РАН, профессор. Количество печатных работ: более 200. Область научных интересов: теория графов, распознавания образов, программирование. E-mail: arl@isa.ru

Spherical constraints in the triplet loss function

K.K. Suloev^I, A.V. Sheshkus^{I,II}, V.L. Arlazarov^I

^I Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^{II} Smart Engines Service, LLC, Moscow, Russia

Abstract. Learning with a triplet loss function is one of the most common approaches in metric learning. It finds its application in the tasks of image comparison, identification, coding, etc. However, the triplet loss function has a number of disadvantages that can negatively affect quality, such as the tendency of the network to get stuck in local minima and the formation of trivial triplets. This paper proposes a geometric approach to improve quality based on the introduction of an additional term in the loss function. The trajectory change is achieved by redirecting solved and unsolved images to the surfaces of two concentric hyperspheres of different radii. The use of this method helps to reduce the distances between images of the same class. The proposed method does not prevent the use of other modifications of the loss function. It is experimentally shown that the proposed approach makes it possible to reduce the number of unsolved triplets and the number of distant pairs of images of the same class.

Keywords: artificial neural networks, metric learning.

DOI: 10.14357/20790279230205

References

1. Alnissany Alaa and Yazan Dayoub. Modified Centroid Triplet Loss for Person Re-Identification. Research Square Platform LLC, 31 Mar. 2022, <http://dx.doi.org/10.21203/rs.3.rs-1501673/v1>. Accessed 21 Feb. 2023.
2. Bucher Maxime, et al. "Improving Semantic Embedding Consistency by Metric Learning for Zero-Shot Classification." *Computer Vision – ECCV 2016*, Springer International Publishing, 2016, pp. 730–46.

- http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-46454-1_44. Accessed 9 Mar. 2023.
3. *Chen Weihua et al.* “Beyond Triplet Loss: A Deep Quadruplet Network for Person Re-Identification.” 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), IEEE, 2017, <http://dx.doi.org/10.1109/cvpr.2017.145>. Accessed 22 Feb. 2023.
 4. *Cui Yin et al.* “Fine-Grained Categorization and Dataset Bootstrapping Using Deep Metric Learning with Humans in the Loop.” 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), IEEE, 2016, <http://dx.doi.org/10.1109/cvpr.2016.130>. Accessed 27 Feb. 2023.
 5. *Gayer Alexander et al.* “Effective Real-Time Augmentation of Training Dataset for the Neural Networks Learning.” Eleventh International Conference on Machine Vision (ICMV 2018), SPIE, 2019, <http://dx.doi.org/10.1117/12.2522969>. Accessed 21 Feb. 2023.
 6. *Hadsell R. et al.* “Dimensionality Reduction by Learning an Invariant Mapping.” 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition – Volume 2 (CVPR’06), IEEE, <http://dx.doi.org/10.1109/cvpr.2006.100>. Accessed 24 Mar. 2023.
 7. *Min Zhu and Zhang Chongyang.* “Few-Shot Object Detection via Metric Learning.” Fourteenth International Conference on Machine Vision (ICMV 2021), SPIE, 2022, <http://dx.doi.org/10.1117/12.2622909>. Accessed 24 Mar. 2023.
 8. *Mokin Arseniy et al.* “Auto-Clustering Pairs Generation Method for Siamese Neural Networks Training.” Fourteenth International Conference on Machine Vision (ICMV 2021), SPIE, 2022, <http://dx.doi.org/10.1117/12.2623139>. Accessed 24 Mar. 2023.
 9. *Schroff Florian et al.* “FaceNet: A Unified Embedding for Face Recognition and Clustering.” 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), IEEE, 2015, <http://dx.doi.org/10.1109/cvpr.2015.7298682>. Accessed 21 Feb. 2023.
 10. *Sheshkus A. et al.* “Tiny CNN for Feature Point Description for Document Analysis: Approach and Dataset.” *Computer Optics*, vol. 46, no. 3, June 2022, <https://doi.org/10.18287/2412-6179-co-1016>.
 11. *Uzhinskiy A.V. et al.* “One-Shot Learning with Triplet Loss for Vegetation Classification Tasks.” *Computer Optics*, vol. 45, no. 4, Aug. 2021, <https://doi.org/10.18287/2412-6179-co-856>.
 12. *Venkataramanan Aishwarya et al.* “Tackling Inter-Class Similarity and Intra-Class Variance for Microscopic Image-Based Classification.” *Lecture Notes in Computer Science*, Springer International Publishing, 2021, pp. 93–103, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-87156-7_8. Accessed 21 Feb. 2023.
 13. *Wang Jiang et al.* “Learning Fine-Grained Image Similarity with Deep Ranking.” 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE, 2014, <http://dx.doi.org/10.1109/cvpr.2014.180>. Accessed 27 Feb. 2023.
 14. *Wieczorek Mikołaj et al.* “On the Unreasonable Effectiveness of Centroids in Image Retrieval.” *Neural Information Processing*, Springer International Publishing, 2021, pp. 212–23, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-92273-3_18. Accessed 22 Feb. 2023.
 15. *Wu Chao-Yuan et al.* “Sampling Matters in Deep Embedding Learning.” 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), IEEE, 2017, <http://dx.doi.org/10.1109/iccv.2017.309>. Accessed 22 Feb. 2023.
 16. *O.A. Slavin.* “Object Descriptors for Linking Structural Elements of Noisy Document Images,” *ITiVS*, no 4, pp. 13-24, 2022, DOI: 10.14357/20718632220402.
 17. *Hermans Alexander, Lucas Beyer and Bastian Leibe.* “In defense of the triplet loss for person re-identification.” *arXiv preprint arXiv:1703.07737* (2017).
 18. *Ha Mai Lan and Volker Blanz.* “Deep ranking with adaptive margin triplet loss.” *arXiv preprint arXiv:2107.06187* (2021).
 19. *Xu Albert et al.* “Mathematical Justification of Hard Negative Mining via Isometric Approximation Theorem.” *arXiv preprint arXiv:2210.11173*. 2022.

Suloev K.K. LLC “Smart Engines Service”, Moscow, Russia. Researcher-Programmer. Scientific interests: deep neural networks, computer vision, generative neural networks. E-mail: k.suloev@smartengines.com

Sheshkus A.V. Researcher, Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, 44/2 Vavilova str., Moscow, 119333, Russia. He has more than 50 published papers. His research interests include deep neural networks, computer vision, and projective invariant image segmentation. E-mail: asheshkus@smartengines.com

Arslazarov V.L. Institute for Systems Analysis, Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, 44/2 Vavilova str., Moscow, 119333, Russia. Head of the department, Corresponding member. RAS, Professor. Number of publications: great than 100 papers and books. Scientific interests: artificial intelligence, recognition systems, information technology, programming. E-mail: arl@isa.ru

Математическое моделирование

Система модельно-ориентированного программирования

Л.В. Круглов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский педагогический государственный университет», г. Москва, Россия

Аннотация. Задача исследования сложных многокомпонентных систем появляется в различных областях деятельности человека, и зачастую единственным возможным способом их анализа является имитационное моделирование. Такие системы могут быть заданы через описание своих составных частей (агентов), их поведения и взаимодействия. В данной работе рассматривается система программирования для алгоритмически полной «модельно-ориентированной» парадигмы, основывающейся на понятии «модели-компоненты» – сложной структуры с заданными характеристиками и поведением, семейство которых замкнуто относительно операции объединения в объемлющие структуры, называемые «моделями-комплексам». Рассматриваемая система программирования позволяет разрабатывать модели при помощи декларативного подхода, требует ограниченного применения других парадигм программирования для реализации деталей поведения агентов и предполагает естественным образом проводить параллельные вычисления.

Ключевые слова: модельно-ориентированное программирование, модельный синтез, система программирования, сложные системы, имитационное моделирование.

DOI: 10.14357/20790279230206

Введение

В связи с постоянным ростом сложности систем, применяемых в различных областях деятельности человека [1-3], моделирование играет все более значимую роль в процессе разработки и исследования их поведения, и во многих случаях симуляция является единственным способом проведения такого анализа. Отсюда следует сложность задачи формализации структуры и функционирования системы, а применение императивной объектно-ориентированной парадигмы при описании характеристик системы требует явной организации вычислений через вызовы методов объектов,

что вносит дополнительную сложность в процесс разработки моделей и их отладки. Применение декларативного подхода, напротив, позволяет избежать явной организации вычислительного процесса при помощи описания структуры системы в терминах поведения и взаимодействия входящих в нее компонент [4]. Однако декларативная парадигма программирования достаточно плохо подходит для моделирования поведения агентов, являющихся некоторыми алгоритмами или функциональными зависимостями.

Вследствие этого, наиболее перспективными являются комбинированные подходы к модели-

рованию сложных систем, сочетающие декларативные средства формализации их структуры и функционирования и применения императивной или функциональной парадигмы для реализации отдельных элементов, отвечающих за поведение агентов системы. Такие совмещенные методы позволяют эффективно использовать преимущества каждой парадигмы и уменьшать влияние их недостатков.

Такой подход реализуется в рамках модельно-ориентированной парадигмы программирования [4], которая позволяет строить модели и разрабатывать программы из более агрегированных примитивов, называемых моделями-компонентами, и обладающих более высоким уровнем инкапсуляции по сравнению с объектно-ориентированной парадигмой. Синтезируемая из таких компонент система сама является моделью-компонентой, что позволяет применять единообразный процесс вычисления для широкого класса моделируемых систем. В рамках модельно-ориентированного подхода определение структуры системы и взаимодействия ее составных частей осуществляется при помощи некоторого декларативного языка, а для реализации функциональности агентов может применяться любая подходящая в каждом конкретном случае парадигма, что обеспечивает значительную гибкость для разработчиков моделей.

В данной работе показывается, что будучи отдельной парадигмой, модельно-ориентированное программирование является алгоритмически полным. Это означает, что данный подход может быть успешно применен к более широкому классу задач, чем моделирование сложных систем. Также в данной работе доказываются свойства корректности исполнения модельно-ориентированных программ, на основании которых была разработана система программирования, реализующая рассмотренные идеи совмещения различных парадигм программирования для проведения имитационных вычислений моделей сложных агентных систем.

1. Сравнение с другими подходами

Рассмотрим некоторые существующие подходы к задаче моделирования сложных систем.

Одним из них является унифицированный язык моделирования UML [5], который позволяет представлять структуру систем и проходящие в них процессы в графическом виде. В результате его применения получается объектно-ориентированная модель системы, для которой возможна генерация кода входящих в нее классов, отражающих структуру системы, но не взаимодействие ее

компонентов, что объясняет ограниченную применимость UML.

Объектно-ориентированный анализ [6] в настоящее время широко применяется в индустрии программного обеспечения и имеет ряд схожих черт с модельно-ориентированным программированием. Так, оба подхода инкапсулируют свое состояние в базовой единице абстракции, которая включает в себя механизмы манипуляции своим состоянием. Однако в модельно-ориентированном программировании отсутствует возможность изменять состояние извне, из чего следует более высокий уровень инкапсуляции модельно-ориентированного подхода по сравнению с объектно-ориентированным, что упрощает восприятие структуры системы. Явная организация вычислений при применении объектно-ориентированного подхода позволяет добиваться большего параллелизма исполнения, чем при использовании модельно-ориентированного программирования, которое, с другой стороны, поддерживает менее гибкий, но автоматический параллелизм на уровне поведения компонент-системы с синхронизацией в главном процессе исполнения.

В рамках разработки создаются концептуальные модели, объединяющие данные и поведение систем и опускающие детали реализации с целью упрощения восприятия моделей [7]. В случае использования специальных языков описания систем (например, языка анализа и разработки архитектуры AADL [8]) также возможна частичная генерация программного кода модели. Однако данный подход в общем случае позволяет получить лишь неполное представление системы, требующее явной программной реализации, либо строить системы из заранее подготовленного ограниченного набора элементов. Таким образом, данный подход также имеет ограниченную применимость.

Еще одним важным способом решения задачи моделирования сложных агентных систем является агентно-ориентированное программирование [9, 10], в рамках которого система представляется как объединение взаимодействующих при помощи обмена сообщениями агентов, обладающих сложным «психическим» состоянием. Для реализации такого подхода необходима отдельная система программирования. Одна из ее реализаций, основывающаяся на агентно-ориентированном языке общего назначения SARL, описана в работе [11]. Как и в случае модельно-ориентированного подхода, базовая единица абстракции обладает своим состоянием и поведением, описываемыми на декларативном языке, а процесс исполнения

задается универсальной процедурой. Однако психическое состояние и поведение агентов является гораздо более ограниченным (ввиду наличия темпоральных способностей, обязательств и т.д.), чем состояние и поведение компонент модельно-ориентированного программирования. Кроме того, модельно-ориентированный подход позволяет объединять компоненты в более агрегированные сущности, что невозможно в рамках агентно-ориентированного программирования.

Таким образом, можно сделать вывод, что модельно-ориентированное программирование является шагом по увеличению уровня абстракции относительно объектно-ориентированного и агентно-ориентированного подходов. С учетом возможности применения различных парадигм для программирования поведения компонент это позволяет упростить анализ и разработку сложных систем, хоть и в некоторых случаях ведет к уменьшению гибкости по сравнению с другими подходами.

2. Модельно-ориентированное программирование

Сложная агентная система согласно определению, используемому в работе [12], может рассматриваться как «составной объект, части которого также могут быть системами, объединенными естественным образом в соответствии с определенными принципами или набором взаимосвязей». Это означает, что компоненты сложных систем сами могут являться сложными системами и что устройство базовых элементов системы (атомов, примитивов), их поведение и правила взаимодействия явно заданы. Такие компоненты системы, имеющие свое внутреннее состояние, определенное поведение и время от времени взаимодействующие между собой, называются агентами.

Реализуемый в данной работе подход основывается на понятиях «модели-компоненты» и «модельного синтеза», подробно описываемых в работах [4, 12]. Приведем основные принципы их устройства и функционирования, на которых основывается разработанная система модельно-ориентированного программирования в соответствии с работой [13].

Модель-компонента является базовой концепцией рассматриваемого подхода. Она может иметь некоторые свойства и поведение и рассматриваться как элементарный строительный блок моделируемой системы.

Каждая модель-компонента имеет набор внутренних и внешних характеристик. Внутренние характеристики являются ее именованным состо-

янием, а внешние характеристики – параметрами окружающей среды для модели-компоненты.

В отличие от объектно-ориентированного подхода процедуры манипуляции внутренними характеристиками модели-компоненты, называемые элементами, не могут быть вызваны снаружи самой модели-компоненты. Элементы организуются в независимые друг от друга процессы, состоящие из последовательности элементов и правил переключения текущих элементов. Независимость процессов означает, что множества вычисляемых их текущими элементами внутренних характеристик не пересекаются, откуда следует возможность их параллельного выполнения [14]. Программные реализации элементов называются методами.

Элементы модели-компоненты подразделяются на два класса: быстрые и медленные. Быстрыми элементами моделируются мгновенные изменения состояния модели, и они используются для вычисления дискретных характеристик анализируемой системы. Медленным элементам, напротив, требуется ненулевое модельное время для своего выполнения. Поэтому такие элементы используются для вычисления непрерывных характеристик моделируемой системы.

Переключения текущих элементов процессов осуществляются в результате срабатывания событий – точек синхронизации процессов, в которых требуется реакция системы на изменившиеся значения характеристик. Переключения элементов должны быть однозначными. В таком случае они будут представлять собой детерминированный конечный автомат для каждого процесса, в котором состояниями будут являться элементы модели-компоненты, а переходы между ними – определяться срабатыванием событий. Задача определения наличия нарушения однозначности переключения элементов для произвольной модели-компоненты является алгоритмически неразрешимой, что будет рассмотрено далее в Разделе 3. События также могут вычисляться параллельно [14].

Формально, событие – это функция $\Delta t = E(x, a)$ от внутренних характеристик x и внешних характеристик a модели-компоненты, которая возвращает в начале шага симуляции ожидаемое время до его срабатывания. Срабатывание события в момент времени t_i определяется уравнением:

$$E(x_i, a) = 0,$$

где x_i – вектор внутренних характеристик в момент времени t_i .

События управляют переключением элементов процессов модели-компоненты следующим образом: для каждой упорядоченной пары пере-

ключаемых элементов $\{f, g\}$ должно существовать единственное событие $E_{f,g}$, при срабатывании которого будет осуществлено переключение этих элементов. Одновременное срабатывание некоторых двух событий $E_{f,g}$ и $E_{f,h}$ означает ошибку в проектировании модели.

Формально, модель-компоненту можно определить как алгоритм F , вычисляющий значения внутренних характеристик на каждом шаге процесса симуляции [15]:

$$x_{i+1} = F(x_i, a, \Delta t),$$

где x_i – вектор внутренних характеристик в момент времени t_i , a – вектор внешних характеристик, а $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ – следующий интервал модельного времени. Из данного определения следует существование универсальной процедуры исполнения модели-компоненты.

Наличие такой процедуры означает, что система является замкнутой: предполагается, что разработчик обладает достаточной информацией о системе для построения модели, которая сможет воспроизвести ее динамику (то есть значения ее внутренних характеристик) в любой момент модельного времени некоторого временного отрезка при условии, что известно ее начальное состояние [4].

Поведение модели-компоненты определяется ее характеристиками и множеством имеющих к ним доступ элементов и изменяется в результате срабатывания событий. Универсальная процедура исполнения модели-компоненты реализует ее поведение и однозначно определяет порядок имитационных вычислений (симуляции). Она задается следующим алгоритмом [4, 13]:

1. Вычислить события для текущих методов.
2. Выполнить переключение текущих методов согласно вычисленным событиям.
3. Вычислить следующий шаг модельного времени.
4. Выполнить текущие методы.
5. Перейти к Шагу 1.

Шагом (итерацией) симуляции будем называть последовательность Шагов 1-4 данного алгоритма.

Модель-комплекс. Несколько моделей-компонент могут быть объединены в рамках более высокоуровневой сущности, называемой модель-комплекс, в которой некоторые модели-компоненты могут явно моделировать внешние характеристики некоторых других моделей-компонент. Семейство математических объектов «модель-компонента» является замкнутым относительно операции объединения в рамках «моделей-комплексов» [4]. Это означает, что модель-комплекс сама является моделью-компонентой, что позволяет разработчикам

реализовывать многокомпонентные модели систем со сколь угодно большим уровнем вложенности и гарантирует применимость универсальной процедуры исполнения для построенных моделей-комплексов.

Для задания модели-комплекса достаточно указать:

- 1) включаемые модели-компоненты и их количество;
- 2) коммутацию внутренних и внешних характеристик моделей-компонент – соответствие некоторых внутренних характеристик одних экземпляров моделей-компонент внешним характеристикам других экземпляров моделей-компонент;
- 3) отождествление внешних характеристик моделей-компонент – соответствие некоторых внешних характеристик одних экземпляров моделей-компонент внешним характеристикам других экземпляров моделей-компонент.

Важно отметить, что при объединении моделей-компонент в процессе модельного синтеза в модель-комплекс однозначность вычисления внутренних характеристик может быть нарушена, что будет означать наличие ошибки в проектировании модели. Задача определения наличия нарушения однозначности вычисления внутренних характеристик для произвольной модели-компоненты является алгоритмически неразрешимой, что будет показано далее в Разделе 3.

Модельно-ориентированное программирование. На основании рассмотренных выше концепций можно ввести понятие модельно-ориентированного программирования (или модельно-ориентированной парадигмы программирования) как реализации моделей сложных агентных систем при помощи моделей-компонент и моделей-комплексов, исполнение которых определяется универсальной процедурой исполнения модели-компоненты.

Модельно-ориентированный подход позволяет разделить процесс программирования на два основных шага:

1. Декларативное программирование моделей-компонент и моделей-комплексов.
2. Функциональное или императивное программирование реализаций элементов и событий моделей-компонент (или при необходимости применение некоторой другой подходящей парадигмы программирования).

Таким образом, структура и взаимодействие агентов сложных систем программируется при помощи декларативных средств, а детали их поведения реализуются при помощи подходящей в ка-

ждом конкретном случае парадигмы программирования, что позволяет сократить время разработки и уменьшить количество ошибок в разработанных программах [13].

3. Алгоритмическая полнота

Далее рассмотрим утверждение об алгоритмической полноте модельно-ориентированной парадигмы программирования [13]. Доказательство будет проведено при помощи реализации машины Тьюринга с полубесконечной лентой [16] (имеющей такую же вычислительную мощность, что и обычная машина Тьюринга) при помощи модельно-ориентированного подхода.

Теорема (об алгоритмической полноте). Модельно-ориентированная парадигма программирования алгоритмически полна.

Доказательство. Построим машину Тьюринга с полубесконечной лентой на основе понятия модели-компоненты следующим образом:

1. Множество значений $Q = \{q_0, q_1, \dots, q_m\}$ внутренней характеристики x_q некоторой модели-компоненты представляет собой множество состояний машины Тьюринга.
2. Значение q_0 характеристики x_q представляет начальное состояние.
3. Множество значений $T \subseteq Q$ характеристики x_q представляет множество конечных состояний.
4. Внутренние характеристики $X = \{x_1, x_2, \dots\}$ представляют полубесконечную ленту.
5. Номер внутренней характеристики $c \in \{1, 2, \dots\}$ обозначает текущую ячейку полубесконечной ленты, $x_c \in X$.
6. Номер внутренней характеристики $k \in \{1, 2, \dots\}$ обозначает начальную ячейку полубесконечной ленты, $x_k \in X$.
7. Множество S допустимых значений внутренних характеристик X представляет символы алфавита ленты.
8. Значение b внутренних характеристик $b \in S$ является пустым символом.
9. Множество $S' \subseteq S \setminus \{b\}$ значений внутренних характеристик X представляет множество допустимых символов начального слова.
10. Множество внутренних характеристик $X' = \{x_1, \dots, x_j\} \subset X$ представляет инициализированные начальным словом ячейки ленты, внутренние характеристики $x_b \in X \setminus X'$ имеют пустой символ в качестве начального.
11. Функция перехода представляется быстрым элементом $f_t = f(x_q, x_c, X)$, который изменяет значение текущей ячейки в соответствии с текущим состоянием x_q и текущим значением

внутренней характеристики x_c , обновляет значение текущего состояния и увеличивает на единицу, уменьшает на единицу либо оставляет без изменений номер текущей характеристики c .

12. Исполнение элемента f , представляющего функцию перехода, инициируется срабатыванием пустого события E_{ff} в начале каждого шага симуляции.

13. Исполнение модели-компоненты останавливается, если значение характеристики x_q , представляющей текущее состояние, входит в множество конечных состояний, то есть при $x_q = q_t \in T$.

В результате указанного построения была получена семерка $\langle S, b, S', Q, T, q_0, F \rangle$, представляющая машину Тьюринга с полубесконечной лентой, реализованную на основе модели-компоненты, и описан порядок ее исполнения и инициализации исходных данных. Теорема доказана.

Алгоритмическая полнота модельно-ориентированной парадигмы программирования показывает, что применимость данного подхода не ограничивается моделированием агентных систем, но что он также позволяет реализовать любую вычислимую функцию [16] (то есть реализуемую машиной Тьюринга).

4. Корректность модельно-ориентированных программ

В данном разделе будет рассмотрен ряд свойств модельно-ориентированной парадигмы программирования, который определяет выразительные возможности системы модельно-ориентированного программирования и ограничивает функциональные возможности этапов компиляции и исполнения программ. Для формализации таких ограничений необходимо ввести понятие модельно-ориентированной программы и ее состояния.

Определение. Под *модельно-ориентированной программой* будем понимать пятерку:

$$M = \langle I, O, P, E, S \rangle,$$

где I – множество внутренних характеристик, O – множество внешних характеристик, P – множество процессов, E – множество событий, S – детерминированные конечные автоматы, описывающие переключения методов каждого процесса.

Определение. Под состоянием *модельно-ориентированной программы* будем понимать тройку:

$$M = \langle I_c, P_c, T_c \rangle,$$

где I_c – множество фактических значений внутренних характеристик I , P_c – набор элементов процес-

сов P , каждый из которых является текущим в своем процессе, T_c – текущее модельное время.

Определение. *Состоянием с корректным вычислением событий* будем называть состояние, при выполнении шага симуляции, на котором не происходит одновременного наступления события ни для одного процесса. *Состоянием с корректным вычислением элементов* будем называть состояние, для которого у любой пары текущих элементов множества вычисляемых внутренних характеристик не пересекаются.

Далее рассмотрим два фундаментальных свойства модельно-ориентированных программ, ограничивающих теоретическую возможность определения корректности вычисления событий и элементов.

Теорема (о корректности вычисления событий). Задача определения состояния, в котором нарушается корректность вычисления событий модельно-ориентированной программы, является алгоритмически неразрешимой.

Доказательство. Проведем доказательство от противного. Допустим, что существует такой алгоритм $A(I, O, m_1, m_2)$, который по некоторому представлению двух методов, реализующих события модельно-ориентированной программы и являющихся некоторыми произвольными машинами Тьюринга, определяет, могут ли они на некоторых входных данных завершиться с одинаковым результатом. Пусть данный алгоритм возвращает единицу в случае положительного ответа и ноль – иначе.

Далее рассмотрим некоторую произвольную программу p и некоторые входные данные I_p к ней, представленные в качестве внутренних характеристик, и применим алгоритм $A: A(I_p, \emptyset, p, p)$. В результате работы алгоритма получим единицу, если программа p завершается на входных данных I_p , и получим ноль, если не завершается. Таким образом, мы пришли к противоречию, так как при наличии алгоритма A становится возможным решить проблему останова [17]. Теорема доказана.

Теорема (о корректности вычисления элементов). Задача определения состояния, в котором нарушается корректность вычисления элементов модельно-ориентированной программы, является алгоритмически неразрешимой.

Доказательство. Аналогично проведем доказательство от противного. Допустим, что существует такой алгоритм $A(I, O, P, E, S)$, который для заданной модельно-ориентированной программы $M \langle I, O, P, E, S \rangle$ определяет, может ли она при исполнении на некоторых начальных значениях характеристик I и O перейти в состояние, в котором

некоторые два элемента $p_1, p_2 \in P$ возвращают значения для пересекающихся множеств внутренних характеристик. Пусть данный алгоритм возвращает единицу в случае положительного ответа и ноль – иначе.

Далее рассмотрим некоторую произвольную программу p и некоторые входные данные I_p к ней, представленные в качестве внутренних характеристик. Построим модельно-ориентированную программу $M_p \langle I_p, \emptyset, P_p, E_p, S_p \rangle$ следующим образом:

- 1) множество внутренних характеристик I_p соответствует входным параметрам программы p , множество внешних характеристик пусто;
- 2) множество процессов P_p состоит из двух элементов $\{p_1, p_2\}$: $p_i = \{a_i, b_i\}$, причем элементы a_i реализуются тривиальной программой, всегда возвращающей значение ноль для характеристики под номером i , а элемент b всегда возвращает ноль для первой характеристики;
- 3) множество событий E_p состоит из одного элемента e_p , реализуемого программой p' , которая запускает программу p и возвращает единственное число на основе значений выходных параметров программы p ;
- 4) множество конечных автоматов процессов S_p состоит из двух одинаковых элементов s : переключение $a \rightarrow b$ по событию e_p .

Применим алгоритм A к построенной программе M_p для некоторых начальных значений внутренних характеристик I_p' : $A(M_p)$. По построению оба процесса при переходе по событию e_p (то есть в результате успешного исполнения программы p на входных данных I_p) будут иметь элемент b в качестве нового текущего, возвращающий значение первой характеристики, и алгоритм A решает задачу обнаружения факта такого перехода. Следовательно, в результате работы алгоритма получим единицу, если программа p завершается на входных данных I_p , и получим ноль, если не завершается. Таким образом, мы пришли к противоречию, так как при наличии алгоритма A становится возможным решить проблему останова. Теорема доказана.

С точки зрения разработки системы модельно-ориентированного программирования данные фундаментальные утверждения означают, что по записи модельно-ориентированной программы на этапе компиляции невозможно определить ее корректность, что влечет за собой необходимость как наличия проверок времени исполнения, обеспечивающихся системой программирования, так и дополнительного контроля со стороны разработчиков моделей за процессом их симуляции.

Далее рассмотрим ряд свойств модельно-ориентированных программ, связанных непосред-

ственно с обработкой их формального представления. Так как такое формальное представление выполняется как запись на некотором языке, то проверка данных свойств может быть выполнена на этапе компиляции программы.

Определение. Транзитивным отождествлением внешних характеристик компонент модели-комплекса будем называть последовательность отождествлений $c_i = c_p, c_j = c_k, \dots, c_p = c_q, c_m \in O$.

Определение. Корректным набором отождествлений внешних характеристик компонент модели-комплекса будем называть набор, в котором транзитивные отождествления не образуют циклов.

Теорема (о корректности отождествлений в модели-комплексе). Задача проверки корректности отождествления внешних характеристик компонент модели-комплекса алгоритмически разрешима и имеет временную сложность $O(m + n)$, где m – это количество отождествляемых характеристик, а n – количество отождествлений.

Доказательство. Представим отождествления внешних характеристик как направленный граф $G(V, E)$, в котором множество вершин V совпадает со множеством отождествляемых характеристик, а множество ребер E состоит из пар (c_i, c_j) для каждого отождествления $c_i = c_j$. Тогда для определения наличия циклов в транзитивных отождествлениях необходимо и достаточно определить наличие цикла в направленном графе G , например при помощи поиска в глубину [18], откуда следует временная сложность $O(n + m)$. Теорема доказана.

Определение. Корректным набором коммутаций внешних и внутренних характеристик будем называть такой набор, в котором с отождествляемыми внешними характеристиками коммутируется одна и та же внутренняя характеристика.

Теорема (о корректности коммутаций в модели-комплексе). Задача проверки корректности коммутации внешних и внутренних характеристик компонент модели-комплекса алгоритмически разрешима и имеет временную сложность $O(m + n + q)$, где m – количество отождествляемых характеристик, n – количество отождествлений, q – количество коммутаций.

Доказательство. Обойдем граф отождествления внешних характеристик G (после установления факта отсутствия в нем циклов) вглубь по обратному направлению ребер для каждой листовой вершины c_{leaf} . При этом для каждого перехода к следующей вершине c_j в соответствующем отождествлении $c_i = c_j$ заменим характеристику c_j на c_{leaf} .

Так как во множестве отождествлений допускается только одно вхождение характеристики c_i с левой стороны тождеств вида $c_i = c_j$, то у каждой вершины c_i графа G будет не более одного потомка, и, следовательно, указанная замена внешней характеристики будет выполнена единственный раз. Далее для каждой коммутации $c_i = q_k$ (где q_k – некоторая внутренняя характеристика) при наличии замены внешней характеристики на некоторую другую внешнюю характеристику c_{leaf} или выполнения $c_i = c_{leaf}$ запишем q_k в качестве коммутации для c_{leaf} , причем если для c_{leaf} ранее уже была определена некоторая другая коммутация $q_m \neq q_k$, то фиксируется факт нарушения корректности коммутации, так как в таком случае для внешней характеристики c_{leaf} существует более одной коммутации с различными внутренними характеристиками. Замены внешних характеристик на листовые и далее запись коммутаций листовых внешних характеристик на внутренние может быть организована через массивы длин n и m . Отсюда следует временная сложность рассмотренного подхода $O(n + m + q)$. Теорема доказана.

5. Система программирования

Далее рассмотрим разработанную в рамках данной работы систему модельно-ориентированного программирования, теоретической основой которой являются понятия модели-компоненты и модели-комплексы и рассмотренные свойства корректности. Данная система программирования состоит из следующих шести модулей:

- компилятор;
- исполнитель;
- отладчик;
- база данных экспериментов;
- сервер методов;
- подсистема визуализации.

Структура системы модельно-ориентированного программирования и направления взаимодействия ее компонентов показаны на рис. 1. Основные этапы ее работы можно описать следующими шагами:

1. Исходная программа передается компилятору.
2. Затем целевая компонента из скомпилированной программы передается на запуск модулю исполнения (исполнителю).
3. Исполнитель выполняет итерации универсальной процедуры исполнения модели-компоненты.
4. Для удаленного вызова методов исполнитель взаимодействует с одним или несколькими серверами методов.

5. Команды от отладчика поступают в исполнитель, который их выполняет и возвращает результат обратно отладчику.
6. Состояния программы записываются исполнителем в базу данных экспериментов.
7. При необходимости исполнитель оповещает подсистему визуализации о факте обновления состояния программы.

Рассмотрим подробнее основную функциональность модулей системы модельно-ориентированного программирования.

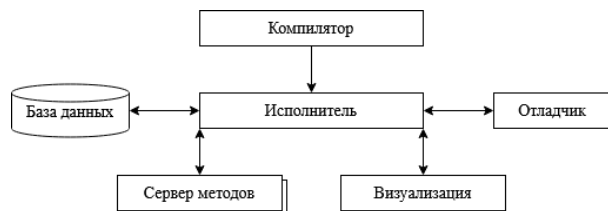


Рис. 1. Структура системы модельно-ориентированного программирования

Компилятор. Исходная программа, содержащая описание моделей-компонент и моделей-комплексов, передается компилятору декларативного «языка компонент и комплексов», основывающегося на работах по модельному синтезу [4, 19]. Компилятор является одним из основных модулей рассматриваемой системы программирования и выполняет следующие задачи:

- синтаксический и семантический анализ кода;
- проверка корректности программы (в том числе корректность отождествлений и коммутаций) и сообщение об ошибках;
- перевод сущностей во внутреннее представление;
- синтез моделей-комплексов;
- генерация представления полученных моделей-компонент на языке компонент и комплексов.

Внутреннее представление используется на этапах проверки корректности кода, синтеза моделей компонент, генерации результирующего кода и далее при симуляции модели.

Исполнитель. Далее полученная программа на языке компонент и комплексов, а также информация о начальных данных передается второму основному модулю системы модельно-ориентированного программирования – исполнителю, который будет выполнять симуляцию указанной модели-компоненты. Главными задачами исполнителя являются:

- 1) выполнение универсальной процедуры исполнения модели-компоненты;
- 2) контроль корректности вычисления событий и элементов;

- 3) запись данных об экспериментах (состояний программы) в базу данных.

В случае обнаружения нарушения свойств корректности пользователю сообщается об ошибке и исполнение останавливается. Для реализации указанной функциональности исполнителю необходимо взаимодействовать со вспомогательными подсистемами: базой данных экспериментов и серверами методов исполнения. При необходимости также осуществляется взаимодействие с модулем визуализации (с целью его уведомления об изменении состояния программы) и отладчиком (для выполнения его команд и возвращения результатов).

База данных экспериментов используется для хранения результатов запусков симуляции моделей. Данная информация сохраняется исполнителем после завершения очередного шага симуляции, что позволяет останавливать и возобновлять симуляцию различных моделей на любом необходимом шаге симуляции.

Сервер методов. Для вычисления элементов и событий используется сервер методов (один или более). Его основными задачами является:

- хранение и выдача информации об их параметрах и способах запуска;
- хранение исполняемого кода методов;
- удаленный запуск методов на исполнение.

Отладчик. Еще одним важным модулем рассматриваемой системы модельно-ориентированного программирования является отладчик, который интерпретирует получаемые команды от пользователя и трансформирует их в запрос для исполнителя. Основная функциональность отладчика включает в себя:

- 1) пошаговое исполнение итераций симуляции, элементов и событий;
- 2) исполнение до заданной итерации и заданного модельного времени;
- 3) чтение и модификация значений внутренних характеристик;
- 4) чтение значений внешних характеристик.

В качестве дополнительной функциональности можно указать возможность останова исполнения на произвольном корректном состоянии с последующим возобновлением исполнения или выполнением отладочных команд.

Визуализация. Подсистема визуализации не является обязательным компонентом описываемой системы программирования, однако наличие возможности отображения хода вычислений может быть крайне полезна во многих случаях. Особенность функционирования данного модуля заключается в том, что программа

```

TYPE Coordinates {
    double x, y;
}
METHOD Move SLOW {
    ADDRESS "localhost";
    INPUT { Coordinates v, c, t; }
    OUTPUT { Coordinates c; }
}
METHOD Select FAST {
    ADDRESS "localhost";
    INPUT { Coordinates c, t(5); }
    OUTPUT { Coordinates t; }
}
METHOD Reached EVENT {
    ADDRESS "localhost";
    INPUT { Coordinates c, t; }
}

COMPLEX Agents {
    COMPONENTS { Dot(3); }
}

COMPONENT Agent {
    PARAM { Coordinates targets(5); }
    PHASE { Coordinates v, cur, next; }
    ELEMENTS { p1:(move: Move), (select: Select); }
    EVENTS { (reached: Reached); }
    SWITCHES { move, select: reached; select, move; }
    COMMUTATION {
        INPUT {
            move.v=PHASE.v;
            move.c=PHASE.cur;
            move.t=PHASE.next;
            select.t=PARAM.targets;
            reached.c=PHASE.cur;
            reached.t=PARAM.next;
        }
        OUTPUT {
            move.c=PHASE.cur;
            select.t=PHASE.next;
        }
    }
}

```

Листинг 1. Модель движения агентов на плоскости

визуализации зависит только от разработчика исполняемой модельно-ориентированной программы, то есть ответственность за отображение данных лежит на разработчике модели. Поэтому единственной задачей данной подсистемы является уведомление пользовательской программы визуализации о появлении новых данных и ожидание ответа от нее о возможности продолжения симуляции.

Пример симуляции. Рассмотрим пример простой модели (Листинг 1) на языке компонент и комплексов [19], интерпретируемой описанной системой программирования. Модель описывает движение трех агентов на плоскости между набором целевых точек. Поведение отдельных агентов моделируется экземплярами компоненты *Agent*, которые объединяются в комплекс *Agents*. Для обновления текущих координат путешественника используется медленный метод *Move*, достижение очередной точки определяется событием *Reached*, выбор следующей точки для посещения осуществляется при помощи быстрого метода *Select*. Программные реализации этих методов предполагаются доступными на локальном сервере методов. Для запуска симуляции данной модели необходимо скомпилировать модель-комплекс *Agents* и задать исходные параметры каждого агента и шаг модельного времени, после чего исполнитель начнет выполнять универсальную процедуру исполнения модели-компоненты.

Заключение

В данной работе были рассмотрены основные принципы функционирования системы модельно-

но-ориентированного программирования. Были доказаны фундаментальные свойства модельно-ориентированной парадигмы программирования, которые составляют теоретическую основу разработанной системы программирования и ограничивают функциональные возможности этапов компиляции и исполнения модельно-ориентированных программ. Также были рассмотрены основные этапы функционирования разработанной системы программирования, взаимосвязь ее модулей и их основные задачи.

Дальнейшим направлением исследований будет определение ограничений существующей реализации системы программирования с целью повышения эффективности ее работы и удобства разработки моделей пользователями.

Литература

1. Turnbull L. et al. Connectivity and complex systems: learning from a multi-disciplinary perspective //Applied Network Science. 2018. Т. 3. №. 1. P. 1-49.
2. Butler S., O'Dwyer J.P. Cooperation and stability for complex systems in resource-limited environments //Theoretical ecology. 2020. Т. 13. №. 2. P. 239-250.
3. Hu Y., Parhizkar T., Mosleh A. Guided simulation for dynamic probabilistic risk assessment of complex systems: concept, method, and application //Reliability Engineering & System Safety. 2022. Т. 217. P. 108047.
4. Бродский Ю.И. Модельный синтез и модельно-ориентированное программирование //Москва: ВЦ РАН. 2013.

5. *D'souza D.F., Wills A.C.* Objects, components, and frameworks with UML: the catalysis approach. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1998.
6. *Booch G. et al.* Object-oriented analysis and design with applications //ACM SIGSOFT software engineering notes. 2008. Т. 33. №. 5. Р. 29-29.
7. *Selic B.* The pragmatics of model-driven development //IEEE software. 2003. Т. 20. №. 5. Р. 19-25.
8. *Feiler P.H., Gluch D.P., Hudak J.J.* The architecture analysis & design language (AADL): An introduction. Carnegie-Mellon Univ Pittsburgh PA Software Engineering Inst. 2006.
9. *Shoham Y.* Agent-oriented programming //Artificial intelligence. 1993. Т. 60. №. 1. Р. 51-92.
10. *Shoham Y.* An overview of agent-oriented programming //Software agents. 1997. Т. 4. Р. 271-290.
11. *Rodriguez S., Gaud N., Galland S.* SARL: a general-purpose agent-oriented programming language //2014 IEEE/WIC/ACM International Joint Conferences on Web Intelligence (WI) and Intelligent Agent Technologies (IAT). IEEE, 2014. Т. 3. Р. 103-110.
12. *Бродский Ю.И.* Роды структур Н. Бурбаки в задаче синтеза имитационных моделей сложных систем и модельно-ориентированное программирование //Журнал Вычислительной математики и математической физики, 2015, Т. 55, № 1, С. 153–164.
13. *Kruglov L., Brodsky Y.* Model-Oriented Programming //Proceedings of CBU in Natural Sciences and ICT. 2021. Т. 2. Р. 63-67.
14. *Бродский Ю.И., Круглов Л.В.* О структурном подходе к концептуальному моделированию широкого класса крупномасштабных систем // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2021). 2021. С. 375-387.
15. *Бродский Ю.И., Павловский Ю.Н.* Разработка инструментальной системы распределенного имитационного моделирования //Информационные технологии и вычислительные системы. 2009. №. 4. С. 9-21.
16. *Goldin D.Q. et al.* Turing machines, transition systems, and interaction //Information and computation. 2004. Т. 194. №. 2. Р. 101-128.
17. *Burkholder L.* The halting problem //ACM SIGACT News. 1987. Т. 18. №. 3. Р. 48-60.
18. *Tarjan R.* Depth-first search and linear graph algorithms //SIAM journal on computing. 1972. Т. 1. №. 2. Р. 146-160.
19. *Brodsky Y., Kruglov L.V.* Model-Oriented Programming as a Consequence of the Structural Theory of Multi-Component Complex Systems // International Journal of Education and Information Technologies. 2021. Т. 15. Р. 1-12.

Круглов Леонид Вячеславович. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский педагогический государственный университет», Учебно-научный центр приоритетных исследований и проблем подготовки научно-педагогических кадров, г. Москва, Россия. Младший научный сотрудник, аспирант. Количество печатных работ: 9. Область научных интересов: теоретическая информатика, моделирование, информационные технологии.
E-mail: leonid.kruglov.cmc@gmail.com

Model-oriented programming system

L.V. Kruglov

Moscow Pedagogical State University, Moscow, Russia

Abstract. The problem of analysis of complex multiple component systems arises in various areas of science and engineering. Modeling and simulation is often the only available approach to it. Such systems can be described in terms of their structure, behavior and interaction of its components (agents). In this work, a programming system for Turing complete “model-oriented” paradigm is proposed, which is based on the concept of “model-component” – a complex structure with fixed characteristics and behavior and without external methods. The set of model-components is closed under the union operation into a containing structure called “model-complex”. The proposed programming system allows to develop models using declarative approach, requires limited application of other paradigms for agent behavior programming and naturally allows parallel computations.

Keywords: *model-oriented programming, model synthesis, programming system, complex systems, simulation modeling.*

DOI: 10.14357/20790279230206

References

1. *Turnbull Laura et al.* Connectivity and complex systems: learning from a multi-disciplinary perspective. *Applied Network Science* 3.1 (2018): 1-49.
2. *Butler Stacey and James P. O'Dwyer.* Cooperation and stability for complex systems in resource-limited environments. *Theoretical ecology* 13.2 (2020): 239-250.
3. *Hu Yunwei, Tarannom Parhizkar and Ali Mosleh.* Guided simulation for dynamic probabilistic risk assessment of complex systems: concept, method, and application. *Reliability Engineering & System Safety* 217 (2022): 108047.
4. *Brodsky Yu.I.* Model'nyj sintez i model'no-orientirovannoe programmirovaniye [Model synthesis and model-oriented programming]. Moscow: CC RAS, 2013.
5. *D'souza, Desmond F. and Alan Cameron Wills.* Objects, components, and frameworks with UML: the catalysis approach. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1998.
6. *Booch Grady et al.* Object-oriented analysis and design with applications. *ACM SIGSOFT software engineering notes* 33.5 (2008): 29-29.
7. *Selic Bran.* The pragmatics of model-driven development. *IEEE software* 20.5 (2003): 19-25.
8. *Feiler Peter H., David P. Gluch and John J. Hudak.* The architecture analysis & design language (AADL): An introduction. Carnegie-Mellon Univ Pittsburgh PA Software Engineering Inst, 2006.
9. *Shoham Yoav.* Agent-oriented programming. *Artificial intelligence* 60.1 (1993): 51-92.
10. *Shoham Yoav.* An overview of agent-oriented programming. *Software agents* 4 (1997): 271-290.
11. *Rodriguez Sebastian, Nicolas Gaud and Stéphane Galland.* SARL: a general-purpose agent-oriented programming language. 2014 IEEE/WIC/ACM International Joint Conferences on Web Intelligence (WI) and Intelligent Agent Technologies (IAT). Vol. 3. IEEE, 2014.
12. *Brodsky Yu.I.* Bourbaki's structure theory in the problem of complex systems simulation models synthesis and model-oriented programming. *Computational Mathematics and Mathematical Physics* 55.1 (2015): 148-159.
13. *Kruglov Leonid and Yury Brodsky.* Model-Oriented Programming. *Proceedings of CBU in Natural Sciences and ICT* 2 (2021): 63-67.
14. *Brodsky Yu.I., Kruglov L.V.* O strukturnom podhode k konceptual'nomu modelirovaniyu shirokogo klassa krupnomasshtabnyh sistem [About structural approach to conceptual modeling of a wide class of large-scale systems]. *Management of Large-Scale System Development (MLSD'2021)*. 2021.
15. *Brodsky Yu.I., Pavlovsky Yu.N.* Razrabotka instrumental'noj sistemy raspredelennogo imitacionnogo modelirovaniya [Development of instrumental system of distributed simulation modeling]. *Journal of Information Technologies and Computing Systems* 4 (2009): 9-21.
16. *Goldin Dina Q. et al.* Turing machines, transition systems, and interaction. *Information and computation* 194.2 (2004): 101-128.
17. *Burkholder Leslie.* The halting problem. *ACM SIGACT News* 18.3 (1987): 48-60.
18. *Tarjan Robert.* "Depth-first search and linear graph algorithms." *SIAM journal on computing* 1.2 (1972): 146-160.
19. *Brodsky Yu.I., Kruglov L.V.* Model-Oriented Programming as a Consequence of the Structural Theory of Multi-Component Complex Systems. *International Journal of Education and Information Technologies* 15 (2021): 1-12.

Kruglov L.V. Moscow Pedagogical State University, Scientific Center of High-Priority Studies and Academic and Teaching Personnel Training, Moscow, Russia. E-mail: leonid.kruglov.cmc@gmail.com.

Computer science and information systems: implementation features in education during the pandemic

L.A. REINGOLD^I, O.V. KLYCHIKHINA^I, A.V. SOLOVYEV^{II}

^I National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

^{II} Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. Computer technologies and information systems are being developed and implemented in all spheres of social life. These systems are especially important in the face of emergencies. They are used during biological threats like the pandemic. Local infections that emerged at a certain place on the planet rapidly spread all over the world. Information technologies allow create conditions of life. One of the examples is education – because full-time education significantly increases the risks of contagion. This article addresses the challenges emerging due to the accelerated implementation of digital technologies. We demonstrate examples of solutions allowing to effectively provide education at National Research University Higher School of Economics (HSE University). These include engaging students as digital assistants in helping different types of users with their issues, using gamification methods in educational process and other projects. The application of such approaches results in a positive synergistic effect facilitates educational process during the pandemic.

Keywords: *computer science, information systems, digitalization, semantic interoperability, the Internet of things, big data, digital assistant, gamification, National Research University Higher School of Economics.*

DOI: 10.14357/20790279230207

Introduction

The implementation of information systems and technologies in different spheres of life affects living conditions, including in particular the increased mobility. There emerge new epidemic threats that are related to both increased mobility and malicious application of biological knowledge. Coronavirus pandemic is one of the examples of such threats that require global anti-pandemic initiatives and actions.

One of the most sought-after instruments to effectively organize society in these conditions is the application of digital technologies enabling remote activities.

One of the directions aimed at introducing digital technologies into society is the use of various types of assistants that facilitate the use of information systems by people. The "digital assistant" metaphor is currently gaining ground in the scientific literature and is being used in a variety of contexts. The established semantic content of this concept is still absent.

Most often, the concept of a digital assistant is considered in the context of the use of various types of assistants: chat bots, voice assistants, and other types of software components. They allow you to automate various, usually routine, elements of human activity.

This applies to various subject areas, for example, pedagogical activity [1], medical diagnostics [2,3], and the integrated solution of issues related to daily human activities [4].

So, for example, this term is used as a tool to help the teacher in learning programming languages to form assignments for students [1]. In this case, a digital assistant is understood as software that performs a number of functions for creating tasks when learning programming and processing the results of their execution by students.

However, despite the rapid progress of automation tools, many complex practical problems can only be solved using human capabilities. To solve problems related to the technical support of a complex heterogeneous automated university system, the Higher School of Economics uses the activities of specially trained students [5, p.372]. This ensures a high level of quality in request fulfillment and user satisfaction. This approach is especially relevant in the context of a pandemic, and is also justified in the context of accelerated import substitution of infrastructure elements of an educational institution, caused by the withdrawal of many foreign vendors from the Russian market.

This includes the sphere of education that it is not easy to manage and maintain functional during the pandemic. Education is a sensitive sphere for the economy and society. It engages children and young adults, employs a significant part of working population; the quality of education greatly influences the socio-economic development of a country.

Traditionally, in the course of education a person becomes socially engaged. This includes a face-to-face communication with a tutor. However, this format of interaction is not compatible with the requirements of anti-pandemic measures. The application of information systems, digital technologies is one of the ways out of this situation.

Digital technologies in education are rapidly developing; full-time education is being gradually supplemented with distant learning. However, the current level of implementation of information systems in education is not sufficient to fully substitute traditional educational practices – there are limitations in communication systems, client devices, methodology and software used in the process of education.

However, the use of digital technologies allows to sufficiently address a lot of educational challenges, and by doing so to loosen restrictions, decrease socio-economic costs. At the same time, there is a need to rapidly develop and implement new information technologies in education.

To address pressing challenges in education during the pandemic there is a need of additional service technologies implemented by digital tools. In particular, the article reviews technologies that are being applied and developed at the National Research University Higher School of Economics (HSE University) to supplement the process of education by developing students' practical skills with digital technologies, by developing soft skills, by improving efficiency of students' and university employees' work. New solutions allow engaging students into activities enabling to address challenges facing the University during the pandemic, increasing the quality of education, the performance of digital services and infrastructure and finding new approaches towards some educational challenges. For example, students' participation contributes to more efficient implementation and application of information systems in University's activities and provides additional moral and financial motivation for students during education.

1. Changes and challenges during the pandemic

1.1. Epidemics and environment

Humans survived many epidemics. By now, people have learned to fight them. However, COVID-19

pandemic has certain distinctive features. There emerged a new level of mobility in the society. Many people can travel fast – within several hours – around the world. Providing substantial (measured by days or weeks) incubation period of the disease, it is not possible to effectively control the spread of the infection.

Besides, there are global crisis circumstances in political and economic spheres that provoke opinions on the possibility of artificial origin of the disease. Another distinctive characteristic of the present-day epidemic is the emergence of digital technologies that influence the process of disease diagnostics and treatment and enable a new level of control over the population. The pandemic drives complex changes in the environment, contributes to the emergence of new socio-economic developments. Now we are witnessing a new stage of society and environment coevolution. The needs and conditions to fulfill them are changing. For example, the use of digital technologies during the pandemic has become obligatory. The examples include the information system to control access by QR codes (used sporadically), general video monitoring of territories, face recognition systems, geolocation control over citizens with the use of mandatory-to-wear communication devices etc. State authorities in different countries are now empowered with instruments and ability to control all spheres of society. This is a new bait for authorities and the pandemic may become an excuse for its implementation.

The use of digital technologies affects citizens' environment. For example, there are restrictions on the use of nature objects – no access to parks, recreational zones and forests during fire-hazardous period or during epidemics to avoid contagion etc. Unlike similar situations in the past, digital technologies make available different monitoring systems, allow registering the announced restrictions. Thus, there is a trend towards better management of social and natural spheres. However, sometimes additional restrictions that are being introduced are not justified by social and economic reasons, they are introduced just because it is technically possible.

Living conditions of individuals and society are changing dramatically. There emerge new challenges in people's surroundings. There is a new constant agent in the form of digital and communication devices between a person and natural and social environments. However, the regulation of these changes is greatly delayed [6].

The communication system is also changing. Normal communication is being replaced by different substitute communications – links exchange in social networks, talking on the phone or via different messengers instead of face-to-face communication. The

structure, contents and information scope of communication is changing too. Communication has become impersonal, often it is just a brief exchange of short messages or videos. This is one of the reasons of so called mosaic thinking which wide spread is being often mentioned in literature. These trends also affect the educational sphere. Methods of motivation, methods of training have to be adapted to the changed perception and available technical devices. One of the examples of such changes is the introduction of gamification into education using digital devices available to students. Different gamification methods are becoming more and more popular at higher education [7].

The structure of manufacturing and services is changing; that provokes respective changes in the scope of working activities. Many jobs and occupations are not needed any more. Whole lines of manufacturing of certain products and services go bankrupt and disappear replaced by new ones. For instance, traditional sales and services are being replaced by online services and home delivery systems. During the pandemic social authorities and governing bodies stimulate distant and remote work wherever it is possible.

At the same time new high-margin businesses appear. During the pandemic these are medical services related to testing, treatment and research of diseases. In high demand are the services providing testing for infection, medication for preventive treatment and therapy of coronavirus infection, equipment and infrastructure for the treatment of critically ill patients. There are information technologies enabling the automatization of diagnostic procedures, remote education and distant work in the forms that help decrease the risk of contagion. The distinctive feature of this pandemic is that medical help is needed by much more citizens than usual providing that there is a shortage of resources for emergency care.

There is a tendency to limit contacts and travels of people using information systems to control these spheres, and to stimulate self-isolation.

Organizational forms and life-supporting technologies involving minimal contacts between people are in demand. Application of information systems in healthcare is now a crucial instrument of state's social policy and an argument in the international affairs.

Restrictions for citizens and for the economy are not always justified and consistent primarily because mankind encountered the pandemic of such scale for the first time. Lack of logic in anti-epidemic and social policies in the opinion of an average person who does not have access to statistical data on epidemic situation leads to social tensions and economic losses.

Digital environment is still developing, there is no clear understanding of its potential and required

restrictions, and consequently we cannot yet predict the influence that the application of digital technologies will have on the society and nature. Even despite that digital technologies are widely used during the pandemic in different socio-economic situations to the extent available on the current technological level.

Generally speaking, the understanding that there should be restrictions at the application of digital technologies is not yet formulated. There may be several scenarios of society's transformation in digital environment, different trajectory of changes. There is a need to research technological capacities and their possible effects.

Business activities during the pandemic are complicated because there are beneficiaries and competition on different levels – between developers of medical technologies, manufacturers, states. Manufactures of different automatization subsystems, drugs, treatment methods, vaccines etc. compete with each other. Rivalry between well-known and obvious beneficiaries of the current pandemic is one of the major factors that causes distrust and social tensions in the society.

These issues may be addressed on different socio-economic levels: on the level of business activities, social groups, states, regions. Let us have a closer look at the changes in educational sphere during the pandemic.

1.2. Development of the structure and contents of education

Education is a very important sphere of people's life. It affects children and young adults of different age groups, it influences the prospects for development and future of the society in general. The system of education is one of the foundations for the development of labor resources. It includes pupils, education specialists, parents and pupils and students' relatives and many other stakeholders. Education is also a very important part of the financial sphere.

The system of education reflects to a large extent socio-economic problems. The pandemic has changed the situation dramatically. It was decided to accelerate the implementation of distant education although social and technical readiness for this form of education is different throughout different regions. Applied solutions are dependent on the international political situation, their application can be restricted by sanctions at any moment. One of the examples is the use of popular communication platform for distant education – Zoom [8]. The solution supplier due to the latest sanctions imposed on Russia limited the usage of the solution for companies that are being financed by the state. Microsoft introduced restrictions for the sale of licenses to Moscow State Technical University.

There are risks that the educational process can be impeded by sanctions at any time. To minimize

risks, it is recommended to use Webinar.ru or Kontur.Talk application. Both of these platforms have a record of being used by the university since before the pandemic. Webinar.ru and Kontur.Talk platforms are fully developed in Russia, and thus holds significant potential for usage inside Russian educational system, according to current regulations. That is why the Ministry of Digital Development, Communications and Mass Media of the Russian Federation recommends to use solutions developed by local companies [9].

The pandemic required that distant learning is introduced into the educational system on different levels as soon as possible. The format, structure and scope of educational activities is changing. It is necessary to be able to adapt to the level of competence and abilities of the students. Distant learning introduced as an emergency may become the reason of underexplored transformations – from technological to ethnocultural and social.

During distant learning we more and more use audio and video materials instead of face-to-face communication. It is not obvious how to control the quality of education, what effect the new format of education will have on the results of education in the long run. Oral or written exams that demonstrate student's train of thought is being substituted by tests. Generally speaking, students have difficulties with the development of holistic social perception, understanding of accepted behavior, social limitations, and ability to focus attention.

Information technologies used in education are not good enough to transfer knowledge, emotions, experience, and attitude. There are no clear understanding how to organize distant learning taking into account individual traits of a person. Technologies are constantly developing. However, there are still risks of vain needs, pseudo-knowledge that are being formed during education with technical and social limitations.

Lack of face-to-face communication at distant learning does not help transfer life experience between generations. This experience is not always positive, but this is a real material for assessment and formation of person's own mindset. Accelerated implementation of information technologies in education results in emotional and sensuous starvation of students. Socialization process gets a new meaning. This is especially relevant to pupils and students. The society is not yet ready for digital transformation in education but the pandemic situation stimulates the development of this method.

The problem of communication is highly relevant to Russia. Due to the large territory, uneven density of population in many regions the levels of digital technologies development are different.

Many pupils and students cannot afford quality devices. That means that technical devices had insufficient performance capacity and features to process information in multimedia format.

Many teachers do not have required technical devices, training level in digital technologies is often insufficient. Issues arising during education process are addressed by students themselves as they cannot communicate with the teacher, socialize. These factors are likely temporary and especially crucial outside big cities, in small remote schools.

Distant learning with the use of digital technologies has various impact on different educational methods and age groups. Face-to-face personal communication between students and a teacher cannot be effectively substituted by technical means. The use of information technologies at the level available to a mass user can cause discomfort among people. For example, it is not possible to substitute the environment of a group learning by group video conference.

Distant learning is highly dependent on technical means and technologies. In case of serious problems with information infrastructure distant methods of learning may become unavailable, and traditional methods of learning may be already lost.

We are expecting that the listed risk zones and problems are temporary and that they will stimulate both the development of digital technologies and infrastructure in the sphere of education and information digital culture in general. Technologies that can decrease the impact of described risks and negative factors are in high demand nowadays. Such technologies can be implemented by digital means.

2. Addressing the challenges of education with the use of promising Information technologies during the pandemic

Providing all said above, here is a classification of the main types of risks and potential problems in education:

- Socio-economic.
 - a. Political.
 - b. Content generation, identification of the contents of education.
 - c. Communication, securing interaction between all subjects of educational process.
 - d. Methodological – ways of knowledge consolidation, knowledge adoption control.
- Technical.
 - a. Technological.
 - b. Communication.
 - c. Software.
 - d. Interface-related.

Risks and problems listed above have their peculiarities and resolution methods on different levels of education:

- Preschool.
- School (primary, secondary and senior classes).
- Higher education.
- Training of academic staff with the highest qualifications.
- System of advanced training for personnel.
- Self-education.

Challenges faced by the system of education due to the pandemic are addressed with the use of modern information technologies.

Implementation of 5G and in future 6G will allow making communications available for the purposes of education throughout all the territory of our country, guaranteeing high quality of video and audio content exchange, implementing other resource-intensive types of services [10,11].

The changes are expected in the structure of the Internet – data will be addressed by its contents, and data processing will shift from centralized services to devices on the network peripheral [12].

It is likely that educational system will be significantly affected by the mass implementation of the Internet of things technologies [13] and big data processing systems [14]. These technologies on the one hand greatly change society's environment and on the other constitute the informational basis for the development of new educational technologies.

On all levels of the society there are incentives that drive the development of information technologies. They help to perform different activities during the pandemic – registration and analysis of disease spread, examination of peculiarities and mutation of the virus, provision of situational awareness for authorities and citizens.

The application of information technologies in education allows addressing a lot of educational issues on the new qualitative and quantitative level, decreasing the necessity of physical travels in the course of educational activities. We can expect that in future new information technologies in education will substitute traditional technologies without significant decrease of the quality of education.

There is a general problem of semantic interoperability [15] at the implementation of information technologies: users of information technologies need to be guided in the new digital environment, there should be a mutual understanding between teachers and students. So, there is a need to help people understand the meaning and consequences of his/hers interaction with the objects of digital environment in the context of education.

In order to handle educational issues better it is necessary to train users about digital technologies, increase their level of digital knowledge.

Educational environment modelled with the use of digital means in the course of technological development should correspond to the requirements brought by natural and social environments. We can expect that society using digital technologies will develop adaptive capabilities that will allow effectively address educational issues during the pandemic.

3. Information technologies in education during the pandemic

3.1. Information technologies development trends

Let us discuss widespread digital technologies development trends in education during the pandemic.

Currently we are witnessing a rapid development and advancement of communication environment. The pandemic in Russia coincided with the deployment of 5G and massive adoption of low-cost personal computers, tablets, and smartphones available to the majority of pupils and students for education.

The advancement of technological and communicative basis of digitalization will result in the increase of the quality of education. Some of the quality indicators of digital technologies in education include:

- Realistic presentation of educational content.
- Automatization level available to students in educational situations.
- The level of “intellectualization” of the digital environment when performing educational activities. The ability to identify student's problems and provide recommendations in a proactive manner.
- The format of information interaction. Access to the same or better functionality of educational infrastructure than that is available in traditional education.
- Possibility to use video: for communications, in programmable interactive content, for video archives, for demonstration of situations that shows working experience in the studied field, the quality of video: resolution, color rendering, sufficient framerate.
- The use of new technologies for the implementation of gamification: simulators and training devices, group role-playing games, team work in digital environment, digital tokens for encouragement and punishment. The option to remotely participate in multi-player games.
- The use of artificial intelligence technologies in educational activities allows guaranteeing: to

make content more realistic, to make the interface between a person and an automated system more efficient, to generate standardized replies to students' queries, to interpret texts, e.g. provide explanations along the text, comment it, and to use voice interface.

Availability of the listed features will help enhance the "understanding" between a student and an automated system, and will allow interaction with several interconnected systems simultaneously.

Solutions that meet the required quality criteria allow increasing variability of educational situations, generating (including in remote mode) new situations that are resource-intensive in case of physical implementation.

Students and lecturers in educational establishments use different automated systems that interact with each other. This is specifically applicable to higher educational establishments that have many specific features related to the use of software and hardware. Thus, technical and organizational approaches enabling inclusion of lecturers and students into the existing information infrastructure of an establishment are in high demand.

Let us review some new types of educational activities in the digital environment aimed at the resolution of problems defined above that are now being implemented at HSE University and the results of their implementation.

3.2. Examples of practical implementation

Educational establishments use a complex of soft and hardware that is constantly upgraded, changed and reconfigured.

The users – lecturers, students, other members of the staff need to comprehend the information infrastructure inside the establishment and outside of it, and get help with problems they face whenever necessary. Students can be engaged to provide such help.

To address this issue HSE University has a digital assistant service [16]. Work of digital assistants who are usually students has the following effects:

- Students get practical experience. This experience in many cases corresponds to the area of their studies because students focus on specific tasks.
- This work is paid. Students get additional revenues doing tasks related to their future profession.
- The activity of digital assistants is one of the efficient instruments for students' socialization. They do team work that includes communication with students and lecturers in order to support activities aimed at a wider use of information technologies.

Digital assistants fulfill the task of aiding users with practical application of digital technology. They

are front-line operators of technical support for users of the university's information services. Digital assistants work in integrated digital environments such as Jira Service Management and Confluence (<https://www.atlassian.com>). All user inquiries are registered in Jira Service Management system, which then proceeds to track all stages of solving the user's problem, and also gives feedback when necessary. All incoming queries are sorted into categories. Depending on category, an issue is either solved by the digital assistant themselves, or is rerouted to the next line of support and delivered to appropriate department of the university's technical support.

Digital assistants are capable of solving many of the users' questions on their own. To do this, they use knowledge database existing in Confluence (<https://www.atlassian.com>) information system, which is integrated with Jira Service Management.

Apart from being the front desk of technical support, digital assistants also support the university's online events. They maintain right settings of online conferences and calls, manage access to classes and sessions, and prevent trolling and zoom-bombing incidents.

Being the university's students themselves, digital assistants can also help users with questions connected to organization of study process, or navigate them through correct usage of HSE's digital study tools.

In addition to this, digital assistants also act as "Digital Buddies" for international students. Due to pandemic-induced regulations, some of these students attend their classes online while staying in their country of origin. "Digital Buddies" are responsible for supporting them. This task is handled by students with the highest level of English.

Other promising directions for digital assistants' line of work exist. Most importantly, is every aspect of their work they act as mediators and fill in the gaps in users' understanding of technology, building a bridge between them and the university's digital environment.

The use of services provided by digital assistants allowed to increase the level of students' and staff's digital competencies, to solve many issues that were caused by the accelerated transition to remote and distant education during the pandemic. Nowadays the scope of services and communications of project's participants is growing and expanded beyond the university.

Over the year, 90 students from 10 faculties studying under 15 educational programs of both technical and humanities background took part in the project.

There was a research of students' opinion regarding the project. Students evaluated different aspects of their work. Below are the main results of the research.

To the question “Which competences are you developing and/or have already developed during your time as a digital assistant?” we got the following answers.

Almost 90% of the respondents noted that they developed digital skills via their work with digital tools of HSE University.

The second most popular answer (63,9%) was – “Communication skills and team work experience”.

“Time-management skills” were marked by 61% of respondents. Students think that time management skills were driven by remote work because you have to plan your activities throughout the day and balance work with studies.

Digital assistants pointed out the development of abilities for continual learning (41%) stating that working as a digital assistant helps develop new mini competencies. Continual learning skill developed during the project is a life-changing ability in the digital world where you have to adapt to ever changing conditions and stay afloat.

Over 30% of digital assistants consider that the participation in the project helped them understand new opportunities and risks related to the application of digital technologies.

Answers to the question “What gave you the motivation to participate in the project “Digital assistants?” split up as it is demonstrated in Fig. 1. There

are both purely altruistic and financial motives. Students pointed out the fact that they were getting practical experience that can be later included into their CVs. This point is supported by actual employment of students who participated in the project by the leading IT companies.

Students engaged into digital assistants project get different practical experience. The answers to the question “Which competences are you developing and/or have already developed during your time as a digital assistant?” split up according the Fig. 2.

In the course of work as digital assistants students gain practical experience of communication with people, clients, of interaction within a team. These are important knowledge and skills for future managers and specialists who will be implementing information technologies in different subject areas where graduates will choose to work.

The creation of a pool of talented students is an important result of the project. The work drives students to generate new ideas while university specialists have a chance to look at routine tasks of an educational establishment with fresh eyes of young generation.

The project has a positive impact on the quality of education and distant learning. Students become active participants in the digital transformation of the university, get practical skills in the work with information instruments and experience in providing a per-

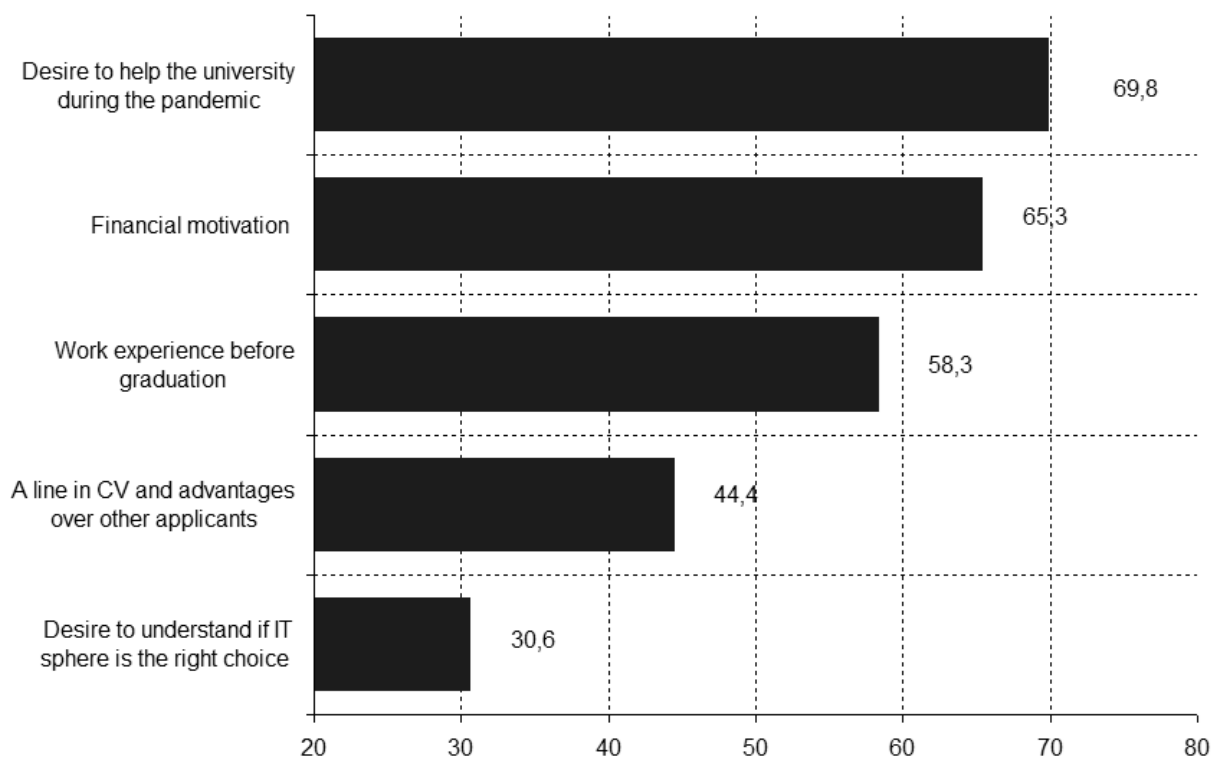


Fig. 1. Motivation of digital assistants for the participation in the project

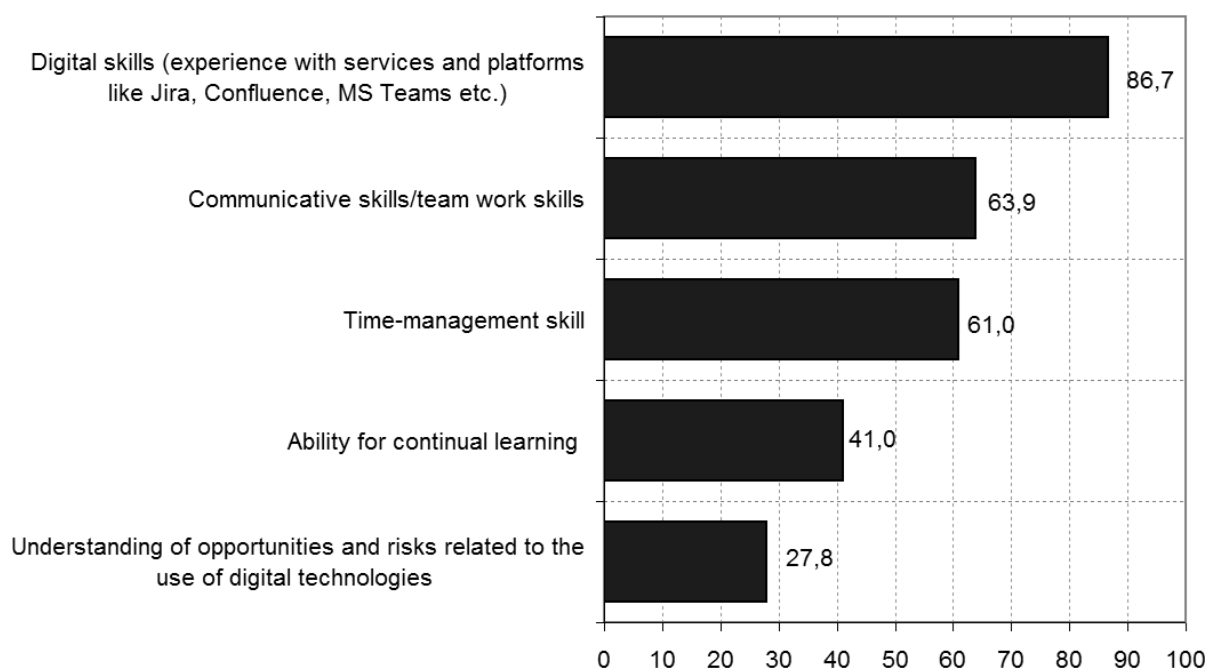


Fig. 2. Self-estimation of competences developed during participation in the project by digital assistants

sonified support to the users. The university in its turn gets additional opportunities for the creation and training of cross-functional student teams that help address issues of university digitalization.

Students participate in operation, development and maintenance of information services inside and outside of the university. In the university these are – scientific, research and extracurricular activities of departments, assistance in organizing online events – seminars, conferences etc. Partnership with the Government of Moscow under the program “Active aging” is the example of university participation in the creating of digital environment outside the university. There are plans to engage students and staff members into helping senior citizens with the use of digital technologies. Besides, there is an idea to engage retired seniors with the high level of competences in digital technologies to work in digitalization sphere.

Students actively participate in the promotion of university’s digital culture in social networks posts, messengers, and popular journals. More than 50% of students who work as digital assistants are willing to share their experience and explain the concept of information services and digitalization in generally. In future the creation of popular scientific-based content will become an important element of project-based interaction with students. The introduction of students’ self-government is a promising development trend of digital assistants’ project. One third of the respondents suggests to engage students as additional project cura-

tors. They will control the work of small student working groups in a horizontal management style. Students will get additional practical skills and knowledge in digital technology sphere as well as a real management and team work experience. This approach helps develop responsibility, realize potential of the youths.

Students’ participation in digital assistant’s project based on the principles of self-governance will allow allocating additional resources for digital transformation of the university and addressing social challenges.

Conclusion

Widespread digitalization, introduction of information technologies allows targeted changes in the society on different levels. However, along with positive effects there are a lot of challenges. It is required to anticipate possible difficulties, manage risks, and measure the implementation of information tools in order to prevent negative outcomes.

The pandemic contributes to the accelerated implementation of digital technologies in activities related to control of socio-economic processes, interpersonal relations, healthcare, education etc.

Education is one of most sensitive spheres to application of information technologies. To overcome issues that emerge during education process it is necessary to introduce new concepts and technological solutions allowing to decrease costs caused by the changes.

New technological, organizational and methodological approaches enabling effective implementation of new technologies are in high demand. HSE University experiment on engagement of students as digital assistants to address educational and social issues is reviewed in this article. We shared the results of the research on the efficiency of this practice and suggest approaches for further development of this activity.

References

1. *Andrianova E.G., Demidova L.A., Sovetov P.N.* «Tsifrovoy assistant prepodavatelya» v massovom professional'nom obuchenii dlya tsifrovoy ekonomiki [Pedagogical design of a digital teaching assistant in massive professional training for the digital economy]. *Russian Technological Journal*. 2022;10(3):7-23. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-7-23>.
2. *Meigal A.Yu. et al.* Ambient Assisted Living At-Home Laboratory for Motor Status Diagnostics in Parkinson's Disease Patients and Aged People // Tools and Technologies for the Development of Cyber-Physical Systems. 2020. doi: 10.4018/978-1-7998-1974-5.ch007.
3. *Yeremin M.D.* Meditsinskiy tsifrovoy assistant. 2021, [Medical digital assistant]. Patent RF No. 2021662449.
4. *Kurysev K.N.* Pravovyye voprosy otvetstvennosti tsifrovyykh assistantov (pomoshchnikov) organizatsiy: problemy i puti resheniya [Legal issues of liability of digital assistants (assistants) of organizations: problems and solutions *Vestnik Vladimirskego yuridicheskogo instituta*, 2022, no. 2(63), pp. 42–47.
5. *Reingold L.A., Soloviev A.V., Klychikhina O.V.* O sotsial'no-ekonomicheskikh posledstviyakh vnedreniya perspektivnykh tsifrovyykh tekhnologiy [On the socio-economic consequences of the introduction of promising digital technologies] *Institut nauchnoy informatsii po obshchestvennym naukam RAN (Moskva)*. Rossiya: Tendentsii i perspektivy razvitiya. Yezhegodnik. Vyp. 16. CH. 2: XII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Regiony Rossii» [Institute of Scientific Information on Social Sciences of the Russian Academy of Sciences (Moscow). Russia: Trends and development prospects. Yearbook. Issue. 16. Part 2: XII International Scientific and Practical Conference “Regions of Russia”], INION. Moscow. pp. 367-374
6. *Reingold L., Reingold E., Soloviev A., Grin O.* Citizens' digital infrastructure as a new element of modern society critical infrastructure, in: CPT2020 Computing for Physics and Technology. The 8 th International Conference on Computing for Physics and Technology (CPT2020). Conference Proceedings (2020), Nizhny Novgorod, Russia, May 11-15, 2020, pp. 128-132. DOI: 10.30987/conferencearticle_5fce2773f10a56.34908891.
7. *Nerush T.G., Nerush A.A.* Sravnitel'ny'j analiz dejstvuyushhix praktik gejmifikatsii vy'sshego obrazovaniya. Informacionny'e tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhny'mi sistemami. [Comparative analysis of existing practices of gamification of higher education], *Informacionny'e tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhny'mi sistemami* [Information technology and mathematical modeling in the management of complex systems] 2 (10). 2021. pp. 60-68. doi: 10.26731/2658-3704.2021.2(10).
8. Zoom otkazy'vaetsya prodlevat' licenzii rossijskim kompaniyam s gosuchastiem [Zoom refuses to renew licenses for Russian state-owned companies]. URL: <https://www.finam.ru/analysis/newsitem/zoom-otkazyvaetsya-prodlevat-licenzii-rossiyskim-kompaniyam-s-gosuchastiem-20210407-091436/>.
9. Mincify' trebovaniya po ispol'zovaniyu rossijskogo paketa prilozhenij kasayutsya tol'ko rabochix kommunikacij chinovnikov i rabotnikov byudzhety'x organizacij. [Ministry of Digital Affairs: the requirements for the use of the Russian package of applications apply only to the working communications of officials and employees of budgetary organizations]. URL: <https://digital.gov.ru/ru/events/41211/>.
10. *Qiao X., Huang Y., Dustdar S., Chen J.* “6G Vision: An AI-Driven Decentralized Network and Service Architecture,” in *IEEE Internet Computing*, vol. 24, no. 4, pp. 33-40, 1 July-Aug. 2020, doi: 10.1109/MIC.2020.2987738.
11. *Korzhov V.* Kontury' 6G [Contours 6G]. *Otkry'ty'e sistemy'* [Open systems], 2020, no. 4. URL: <https://www.osp.ru/os/2020/04/13055725/>
12. *Nur B., Sharif K., Lee F., Wang Yu.* Arxitektura Interneta budushhego [Future Internet Architecture]. *Otkry'ty'e sistemy'* [Open systems], 2020, no. 3. URL: <https://www.osp.ru/os/2020/03/13055599/>
13. *Reingold L.A., Klimenko S.V., Volkov A.I.* Vnedrenie Interneta veshhej i problemy' razvitiya sistemy' znanij [Implementation of the Internet of Things and the problems of the development of the knowledge system], in: SCRT1516 International School-Seminar of the Moscow Institute of Physics and Technology (University) and the Institute of Physical and Techni-

- cal Informatics. November 21-24 2016, Moscow-Protvino, pp 48-57.
14. *Volobueva T.B.* Pedagogicheskij forsajt: bol'shie dannyy'e. Pedagogicheskaya perspektiva [Pedagogical Foresight: Big Data. Pedagogical perspective]. 2021, no. 1. pp. 15-22. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45685346>.
15. *Reingold L.A., Volkov A.I., Kopaygorodsky A.N., Pustozerov E.U.* Semanticheskaya interoperabel'nost' v reshenii finansovy'x zadach i sposoby' ee izmereniya [Semantic interoperability in solving financial problems and ways of measuring it]. *Prikladnaya Informatika* [Journal of Applied Informatics], 2016, vol. 11, no. 4 (64), pp. 115-134 (in Russian).
16. HSE University Digital Assistants. URL: https://it.hse.ru/en/it_assistants/

Reingold L.A. PhD, National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia.

E-mail: lreingold@hse.ru

Klychikhina O.V. National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia.

E-mail: oklychikhina@hse.ru

Solovyev A.V. Chief Researcher, Doctor of Technical Sciences. Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. E-mail: soloviev@isa.ru

Алгоритмические решения задачи фильтрации в стохастической модели информационного противоборства

И.С. Полянский, К.О. Логинов

ФГКВОУ ВО Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации,
г. Орел, Россия

Аннотация. В статье в развитие моделей информационного противоборства в структурированном социуме предложена стохастическая модель фильтрации оценок информационного противоборства. Для простоты представления формируемых решений фильтрации оценок рассмотрена модель информационного противоборства в одногрупповом социуме при одноэтапном переходе индивидов в адепты. Сформированное решение применимо при наличии нескольких разнородных правил измерения параметров модели информационного противоборства. Алгоритмические решения основываются на модели ансамблевого расширенного фильтра Калмана. Уточнены основные этапы алгоритмической реализации составленной стохастической модели фильтрации оценок информационного противоборства. Работоспособность и предпочтительность полученных результатов проверена при проведении серий вычислительных экспериментов для конкретных тестовых задач.

Ключевые слова: оценка информационного воздействия, стохастические модели информационного противоборства, ансамблевый расширенный фильтр Калмана, алгоритм, стохастическое дифференциальное уравнение.

DOI: 10.14357/20790279230208

Введение

В области обеспечения информационной безопасности отдельное внимание уделяется вопросам анализа информационной среды [1], формируемой социальными медиа [2, 3]. Учитывая заданное атрибутивное пространство коммуницирующих пользователей социальных медиа, их исследование удобно выполнять при представлении групп индивидов в виде структурированного социума [4] при формализации механизмов информационных процессов математическими моделями информационного противоборства [5]. Последние задаются в виде дифференциальных уравнений, детерминированный характер параметров которых не позволяет в полной мере оценить степень различия между исходными факторами (даже при существенном увеличении их числа) конкурирующих субъектов.

Для устранения указанного недостатка в [6–8] в приложении к задачам оценки информационного воздействия на электорат при проведении избирательных кампаний в представлениях [5] предложено

вносить флуктуацию воздействия, формируемого внешними источниками информации в отношении политического субъекта (мнения). С позиции универсальности исследования получаемых стохастических динамических систем за методологическую основу составления математических моделей в [6–8] выбрана теория марковских процессов и процессов диффузионного типа [9,10], сводящих исходные дифференциальные уравнения к стохастическим. В [6–8] полагается, что основное информационное воздействие на социум оказывают интенсивности распространения положительной и отрицательной информации от внешних источников, при том, что именно в них содержатся стохастические компоненты. Для уточнения вычислительных особенностей получения оценок итогового информационного воздействия в [11] разработана схема нелинейной фильтрации, предполагающая сведение задачи анализа исходного стохастического дифференциального уравнения к численному решению уравнения Дункана–Мортенсена–Закаи [12] при введении дополнительного фиктивного стохастического дифференциального

уравнения состояния, получаемого из исходного при оценке стохастических компонент (наблюдаемые интенсивности агитации) методами полиспектрального анализа [11,13]. При этом, исходя из потенциально возможного применения различных методов определения наблюдаемых параметров формируемой стохастической модели (интенсивности межличностной коммуникации, распространения положительных и отрицательных сведений), фильтрацию оценок итогового информационного воздействия целесообразно выполнять при исследовании пар стохастических дифференциальных уравнений, однотипные параметры которых наблюдаются различными методами при обеспечении условия некоррелированности шумов наблюдения.

Принимая во внимание выделенную особенность, цель настоящей статьи состоит в разработке вычислительно эффективного решения задачи фильтрации оценок информационного воздействия в стохастических моделях информационного противоборства с последующим выделением основных этапов их алгоритмической реализации при сохранении общности представлений [5].

1. Стохастическая модель фильтрации оценок информационного противоборства

Для простоты представления решений рассмотрим динамическую модель информационного противоборства в одногрупповом социуме при одноступенчатом переходе индивидов в adeptы [5,6]:

$$\frac{dx_k(t)}{dt} = [\alpha_k(t) + \beta(t)x_k(t)] \left[N_0 - \sum_{k'=1}^K x_{k'}(t) \right] - \gamma_k(t)x_k(t), \quad (1)$$

где N_0 – число индивидов в социуме; x_k – число adeptов k -го субъекта ($k=1, K$); K – число субъектов, в отношении которых в социуме формируются предпочтения у индивидов; α_k и γ_k – интенсивности положительной и отрицательной информации, распространяемой внешними источниками в отношении k -го субъекта; β – интенсивность межличностной коммуникации индивидов в социуме; $t \in [0, T_0]$ – момент времени ($[0, T_0]$ – временной интервал анализа); $x_k(0) = 0$.

Наблюдаемыми параметрами модели являются интенсивности $\alpha_k(t)$, $\gamma_k(t)$ и $\beta(t)$. Предположим, что их значения складываются из истинных величин $0 \leq \alpha_k^0(t), \gamma_k^0(t), \beta^0(t) < \infty$ и шумов наблюдения $\tilde{\alpha}_k(t), \tilde{\gamma}_k(t), \tilde{\beta}(t)$ с соответствующими статистическими параметрами: $\mathbb{E}[\tilde{\alpha}_k] = \mathbb{E}[\tilde{\gamma}_k] = \mathbb{E}[\tilde{\beta}] = 0$; $\text{cov}[d\tilde{\alpha}_k, d\tilde{\alpha}_j] = dt \cdot \varepsilon_{kj}^\alpha$; $\text{cov}[d\tilde{\gamma}_k, d\tilde{\gamma}_j] = dt \cdot \varepsilon_{kj}^\gamma$; $\text{cov}[d\tilde{\beta}, d\tilde{\beta}] = dt \cdot \varepsilon^\beta$ ($k, j \in \{1, K\}$). При этом перепишем (1) в виде сто-

хастического дифференциального уравнения, опустив для сокращения записи зависимости в x_k , α_k , γ_k , β от t :

$$dx_k = \left[(\alpha_k^0 + \beta^0 x_k) \left(N_0 - \sum_{k'=1}^K x_{k'} \right) - \gamma_k^0 x_k \right] dt + \left\{ \sum_{j=1}^K \left[\left(N_0 - \sum_{k'=1}^K x_{k'} \right) \sigma_{kj}^\alpha - x_k \sigma_{kj}^\gamma \right] + x_k \left(N_0 - \sum_{k'=1}^K x_{k'} \right) \sigma^\beta \right\} dW_k, \quad (2)$$

где $\sigma_k^\alpha = \sqrt{\varepsilon_k^\alpha}$; $\sigma^\beta = \sqrt{\varepsilon^\beta}$; $\sigma_k^\gamma = \sqrt{\varepsilon_k^\gamma}$; W_k – стандартные винеровские процессы.

Представим (2) в матричном виде:

$$d\vec{X} = \vec{A}(\vec{X}, \vec{\alpha}^0, \beta^0, \vec{\gamma}^0, t) dt + \Sigma(\vec{X}, t) d\vec{W}, \quad (3)$$

где $\vec{X} = (x_k)_K$; $\vec{A} = (a_k)_K$

при $a_k = (\alpha_k^0 + \beta^0 x_k) \left(N_0 - \sum_{k'=1}^K x_{k'} \right) - \gamma_k^0 x_k$;

$\Sigma = \Sigma^\alpha - \Sigma^\gamma + \text{diag}[\vec{D}^\beta]$; $\vec{D}^\beta = (d_k^\beta)_K$

при $d_k^\beta = \left(N_0 - \sum_{k'=1}^K x_{k'} \right) x_k \sigma^\beta$; $\Sigma^\alpha = (e_{kj}^\alpha)_{K \times K}$

при $e_{kj}^\alpha = \left(N_0 - \sum_{k'=1}^K x_{k'} \right) \sigma_{kj}^\alpha$; $\Sigma^\gamma = (e_{kj}^\gamma)_{K \times K}$

при $e_{kj}^\gamma = x_k \sigma_{kj}^\gamma$; $\vec{W} = (W_k)_K$; $\vec{\alpha}^0 = (\alpha_k^0)_K$, $\vec{\gamma}^0 = (\gamma_k^0)_K$.

Предположим, что существует второе независимое от первого правило наблюдения A_k , B , Γ_k соответствующих параметров интенсивностей α_k , β , γ_k в модели (1). При этом имеет место неопределенность в предпочтительности первого и второго правил наблюдения. Тогда, следуя представлениям (2) и (3), запишем вторую систему стохастических дифференциальных уравнений наблюдения за численностью adeptов:

$$d\vec{Y} = \vec{A}(\vec{Y}, \vec{\alpha}^0, \beta^0, \vec{\gamma}^0, t) dt + \Sigma'(\vec{Y}, t) d\vec{V}, \quad (4)$$

где $\vec{Y} = (y_k)_K$; y_k – число adeptов k -го субъекта; $\vec{V} = (V_k)_K$ – K -мерный стандартный винеровский процесс; $\Sigma' = \Sigma'^\alpha - \Sigma'^\gamma + \text{diag}[\vec{D}'^\beta]$; $\vec{D}'^\beta = (d_k'^\beta)_K$

при $d_k'^\beta = \left(N_0 - \sum_{k'=1}^K y_{k'} \right) y_k \sigma'^\beta$; $\Sigma'^\alpha = (e_{kj}'^\alpha)_{K \times K}$

при $e_{kj}'^\alpha = \left(N_0 - \sum_{k'=1}^K y_{k'} \right) \sigma_{kj}'^\alpha$; $\Sigma'^\gamma = (e_{kj}'^\gamma)_{K \times K}$

при $e_{kj}'^\gamma = y_k \sigma_{kj}'^\gamma$; $\sigma_{kj}'^\alpha = \sqrt{\varepsilon_{kj}'^\alpha}$, $\sigma'^\beta = \sqrt{\varepsilon'^\beta}$,

$\sigma_{kj}'^\gamma = \sqrt{\varepsilon_{kj}'^\gamma}$; $\text{cov}[d\alpha'_k, d\alpha'_j] = dt \cdot \varepsilon_{kj}'^\alpha$,

$$\text{cov}[d\beta'] = dt \cdot \varepsilon^{\beta\beta}, \quad \text{cov}[d\gamma'_k, d\gamma'_j] = dt \cdot \varepsilon^{\gamma\gamma}_{kj}$$

$$\text{для } A_k = \alpha_k^0 + \alpha'_k, \quad B = \beta^0 + \beta', \quad \Gamma_k = \gamma_k^0 + \gamma'_k$$

$$\text{при } \mathbb{E}[\alpha'_k] = \mathbb{E}[\gamma'_k] = \mathbb{E}[\beta'] = 0.$$

Задача фильтрации состоит в получении оценок $\hat{X} = (\hat{x}_k)_K$ числа $\hat{x}_k$ адептов k -го субъекта в момент времени $t \in [0, T_0]$ из заданных уравнений (3), (4). Для определения $\hat{X} = (\hat{x}_k)_K$ найдем уравнение состояния субоптимального конечномерного фильтра:

$$d\hat{X}/dt = \bar{\Psi}(\hat{X}, t) + \Omega(\hat{X}, t)\bar{L}_t, \quad (5)$$

где $\bar{L}_t \equiv \bar{L}(t) - K$ - мерный векторный белый шум;

$\bar{\Psi}(\hat{X}, t)$ и $\Omega(\hat{X}, t)$ – функции состояния системы и времени, значениями которых служат K -мерные векторы и $K \times K$ -мерные матрицы.

Аппроксимируя функции плотностей вероятностей распределений $\bar{X}$ и $\bar{Y}$ в (3), (4) нормальным законом и следуя представлениям [9, с. 443–468] при условии некоррелированности соответствующих шумовых компонент α'_k и $\tilde{\alpha}_k$, β' и $\tilde{\beta}$, γ'_k и $\tilde{\gamma}_k$, сведем задачу оценивания $\bar{X}$ (5) к определению вектора сноса $\bar{\Psi}$ математическим ожиданием $\bar{X}$ и диффузионной матрицы Ω ковариационной матрицей P . При этом уравнение фильтрации вида (5) сформируем из двух расширенных фильтров Калмана–Бьюси [14], первый из которых полагает определение уравнения (3) состоянием, а (4) – наблюдением:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \hat{X}^{(1)}(t) &= \bar{A}(\hat{X}^{(1)}, \bar{\alpha}, \beta, \bar{\gamma}, t) + \\ &+ S^{(1)}(t) \left(d\bar{Y} - \bar{A}(\hat{X}^{(1)}, \bar{A}, B, \bar{\Gamma}, t) \right); \end{aligned} \quad (6)$$

$$\hat{X}^{(1)}(0) = 0;$$

$$\begin{aligned} \frac{dP^{(1)}}{dt} &= F(t)P^{(1)}(t) + P^{(1)}(t)F^T(t) + \\ &+ Q(t) - S^{(1)}(t)R(t)[S^{(1)}(t)]^T; \end{aligned} \quad (7)$$

$$P^{(1)}(0) = R(0),$$

а второе наоборот:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \hat{X}^{(2)}(t) &= \bar{A}(\hat{X}^{(2)}, \bar{A}, B, \bar{\Gamma}, t) + \\ &+ S^{(2)}(t) \left(d\bar{X} - \bar{A}(\hat{X}^{(2)}, \bar{\alpha}, \beta, \bar{\gamma}, t) \right); \end{aligned} \quad (8)$$

$$\hat{X}^{(2)}(0) = 0;$$

$$\begin{aligned} \frac{dP^{(2)}}{dt} &= H(t)P^{(2)}(t) + P^{(2)}(t)H^T(t) + \\ &+ R(t) - S^{(2)}(t)Q(t)[S^{(2)}(t)]^T; \end{aligned} \quad (9)$$

$$P^{(2)}(0) = Q(0),$$

$$\text{где } S^{(1)}(t) = P^{(1)}(t)H^T(t)R^{-1}(t);$$

$S^{(2)}(t) = P^{(2)}(t)F^T(t)Q^{-1}(t)$ – оптимальные по Калману матрицы коэффициентов усиления относительно указанных двух случаев; $Q = \Sigma\Sigma^T$ и $R = \Sigma'\Sigma'^T$ – ковариационные матрицы шума моделей (3) и (4) соответственно;

$$\bar{A} = (A_k)_K; \quad \bar{\Gamma} = (\Gamma_k)_K; \quad F = J(\hat{X}, \bar{\alpha}, \beta, \bar{\gamma}, t) \quad \text{и}$$

$H = J(\hat{X}, \bar{A}, B, \bar{\Gamma}, t)$ – матрицы, формируемые через матрицу Якоби $J = (J_{kj})_{K \times K}$ для

соответствующих функций $\bar{A}(\hat{X}, \bar{\alpha}, \beta, \bar{\gamma}, t)$ и

$\bar{A}(\hat{X}, \bar{A}, B, \bar{\Gamma}, t)$ по частным производным переменных из вектора $\bar{X}$:

$$\begin{aligned} J_{kj}(\bar{X}, \bar{\alpha}, \beta, \bar{\gamma}, t) &= \frac{\partial a_k(\bar{X}, \bar{\alpha}, \beta, \bar{\gamma}, t)}{\partial x_j} = \\ &= \begin{cases} -\alpha_k + \beta \left(N_0 - \sum_{k'=1}^K x_{k'} - x_k \right), & k = j; \\ -\alpha_k - \beta x_k, & k \neq j. \end{cases} \end{aligned}$$

По аналогии с решениями типовых задач фильтрации [15,16] итоговую стохастическую модель для $\bar{X}$ из (6)–(9) сформируем в дискретном времени при разбиении интервала наблюдения $[0, T_0]$ на тактовые подинтервалы $t \in [t_j, t_{j+1}]$ ($\Delta t = t_{j+1} - t_j$; $j = \overline{0, N-1}$; $N = T_0/\Delta t$).

Для принятого допущения о нормальном законе распределения в отношении итогового фильтра (5) оценку числа адептов выполним с применением модели ансамблевого фильтра Калмана [17] при определении математического ожидания

$$\hat{X}_j \equiv \hat{X}(t_j) \quad \text{из} \quad \hat{X}_j^{(1)} \equiv \hat{X}^{(1)}(t_j) \quad \text{и} \quad \hat{X}_j^{(2)} \equiv \hat{X}^{(2)}(t_j)$$

по критерию максимума правдоподобия:

$$\hat{X}_j = \left(\hat{X}_j^{(1)} + \hat{X}_j^{(2)} \right) / 2. \quad (10)$$

а ковариационной матрицы $P_j \equiv P(t_j)$ из

$\mathbf{P}_j^{(1)} \equiv \mathbf{P}^{(1)}(t_j)$ и $\mathbf{P}_j^{(2)} \equiv \mathbf{P}^{(2)}(t_j)$ для (10) по правилу

$$\mathbf{P}_j = \text{cov}\left(\bar{X}_j^0 - \hat{X}_j\right) = \frac{1}{4} \text{cov}\left(\bar{X}_j^0 - \hat{X}_j^{(1)}\right) + \frac{1}{4} \text{cov}\left(\bar{X}_j^0 - \hat{X}_j^{(2)}\right) = \frac{1}{4} \left(\mathbf{P}_j^{(1)} + \mathbf{P}_j^{(2)}\right). \quad (11)$$

В выражениях (10), (11) определение элементов $\hat{X}_j^{(1)}$, $\hat{X}_j^{(2)}$, $\mathbf{P}_j^{(1)}$, $\mathbf{P}_j^{(2)}$ выполняется в представлениях моделей расширенного фильтра Калмана [15,16], учитывающих полученные на предыдущем шаге j оценки $\hat{X}_j$ и $\mathbf{P}_j$.

Для сформированной стохастической модели разработаем алгоритм фильтрации оценок информационного противоборства, уточняющий вычислительные особенности решения (5)–(11) при определении компонент ε_k^α , ε_k^β , ε_k^γ , $\varepsilon_k^{\alpha\beta}$, $\varepsilon_k^{\alpha\gamma}$, составляющих правила задания ковариационных матриц шума $\mathbf{Q}$, $\mathbf{R}$.

2. Алгоритм фильтрации оценок информационного противоборства

Входными данными алгоритма являются: время анализа T_0 ; число N отсчетов дискретизации; количество N_0 индивидов в социуме; число K субъектов, в отношении которых формируются предпочтения у индивидов; наблюдаемые функции $\bar{\alpha}$, β , $\bar{\gamma}$, $\bar{A}$, B , $\bar{\Gamma}$.

Выделим основные этапы работы алгоритма, полагая неизвестными параметры ε_k^α , ε_k^β , ε_k^γ , $\varepsilon_k^{\alpha\beta}$, $\varepsilon_k^{\alpha\gamma}$.

Шаг 1. Методом полиспектрального анализа [11,13] в отношении функций $\bar{\alpha}$, β , $\bar{\gamma}$, $\bar{A}$, B , $\bar{\Gamma}$ выполнить оценку соответствующих величин интенсивностей $\hat{\alpha}^1, \hat{\beta}^1, \hat{\gamma}^1, \hat{A}^0, \hat{B}^0, \hat{\Gamma}^0$ и усред-

нением $\hat{\alpha}^0 = 0,5(\hat{\alpha}^1 + \hat{A}^0)$, $\hat{\beta}^0 = 0,5(\hat{\beta}^1 + \hat{B}^0)$,

$\hat{\gamma}^0 = 0,5(\hat{\gamma}^1 + \hat{\Gamma}^0)$ определить приближения для соответствующих истинных значений интенсивностей $\bar{\alpha}^0$, β^0 , $\bar{\gamma}^0$.

Шаг 2. По средневывборочным правилам [18] для $\bar{\alpha}$, β , $\bar{\gamma}$, $\bar{A}$, B , $\bar{\Gamma}$ и найденных $\hat{\alpha}^0$, $\hat{\beta}^0$, $\hat{\gamma}^0$ определить оценку соответствующих параметров ε_k^α , ε_k^β , ε_k^γ , $\varepsilon_k^{\alpha\beta}$, $\varepsilon_k^{\alpha\gamma}$ для задания ковариационных матриц шума $\mathbf{Q}$, $\mathbf{R}$.

Шаг 3. Положить $j = 0$ и определить начальные значения $\bar{Y}_j = 0$, $\bar{X}_j = 0$, $\bar{X}_j^{(1)} = 0$, $\bar{X}_j^{(2)} = 0$, $\mathbf{P}_j = (\mathbf{R}_j + \mathbf{Q}_j)/4$,

где $\mathbf{R}_j = \Sigma'(\bar{Y}_j, t_j) \Sigma^T(\bar{Y}_j, t_j)$,

$\mathbf{Q}_j = \Sigma(\bar{X}_j, t_j) \Sigma^T(\bar{X}_j, t_j)$.

Шаг 4. По методу Эйлера (Эйлера – Маруямы) выполнить экстраполяцию $\bar{X}_{j+1}$, $\bar{Y}_{j+1}$, $\bar{X}_{j+1}^{(1)}$, $\bar{X}_{j+1}^{(2)}$ с учетом моделей (3), (4):

$$\bar{X}_{j+1} = \bar{X}_j + \Delta t \bar{A}(\bar{X}_j, \bar{\alpha}, \beta, \bar{\gamma}, t_j);$$

$$\bar{Y}_{j+1} = \bar{Y}_j + \Delta t \bar{A}(\bar{Y}_j, \bar{A}, B, \bar{\Gamma}, t_j);$$

$$\hat{X}_{j+1}^{(1)} = \hat{X}_j + \Delta t \bar{A}(\hat{X}_j^{(1)}, \bar{\alpha}, \beta, \bar{\gamma}, t_j);$$

$$\hat{X}_{j+1}^{(2)} = \hat{X}_j + \Delta t \bar{A}(\hat{X}_j^{(2)}, \bar{A}, B, \bar{\Gamma}, t_j). \quad (12)$$

Шаг 5. Для заданных $\hat{X}_j$, $\hat{X}_j^{(1)}$, $\hat{X}_j^{(2)}$ вычислить матрицы $\mathbf{H}_j = \mathbf{J}(\hat{X}_j, \bar{A}, B, \bar{\Gamma}, t_j)$, $\mathbf{F}_j = \mathbf{J}(\hat{X}_j, \bar{\alpha}, \beta, \bar{\gamma}, t_j)$, $\tilde{\mathbf{H}}_j = \mathbf{J}(\hat{X}_j^{(2)}, \bar{A}, B, \bar{\Gamma}, t_j)$, $\tilde{\mathbf{F}}_j = \mathbf{J}(\hat{X}_j^{(1)}, \bar{\alpha}, \beta, \bar{\gamma}, t_j)$.

Шаг 6. Вычислить ковариационные матрицы

$\tilde{\mathbf{P}}_j^{(1)}$ и $\tilde{\mathbf{P}}_j^{(2)}$ для экстраполированных $\hat{X}_{j+1}^{(1)}$ и $\hat{X}_{j+1}^{(2)}$:

$$\tilde{\mathbf{P}}_j^{(1)} = \tilde{\mathbf{F}}_j \mathbf{P}_j \tilde{\mathbf{F}}_j^T + \mathbf{Q}_j; \quad \tilde{\mathbf{P}}_j^{(2)} = \tilde{\mathbf{H}}_j \mathbf{P}_j \tilde{\mathbf{H}}_j^T + \mathbf{R}_j. \quad (13)$$

Шаг 7. Учитывая представления ансамблевого фильтра Калмана [17], определить приращение отклонения моделей (3), (4) и (4), (3) для соответствующих фильтров (6), (7) и (8), (9) относительно ожидаемого результата экстраполяции $\bar{X}_j$:

$$\bar{Z}_j^{(1)} = \bar{Y}_{j+1} - \bar{Y}_j - \Delta t \left[\bar{A}(\hat{X}_j^{(1)}, \bar{A}, B, \bar{\Gamma}, t_j) + \bar{A}(\hat{X}_j, \bar{A}, B, \bar{\Gamma}, t_j) \right] / 2;$$

$$\bar{Z}_j^{(2)} = \bar{X}_{j+1} - \bar{X}_j - \Delta t \left[\bar{A}(\hat{X}_j^{(2)}, \bar{\alpha}, \beta, \bar{\gamma}, t_j) + \bar{A}(\hat{X}_j, \bar{\alpha}, \beta, \bar{\gamma}, t_j) \right] / 2. \quad (14)$$

Шаг 8. Рассчитать ковариационные матрицы

$\mathbf{G}_j^{(1)}$, $\mathbf{G}_j^{(2)}$ для $\bar{Z}_j^{(1)}$, $\bar{Z}_j^{(2)}$:

$$\mathbf{G}_j^{(1)} = \hat{\mathbf{H}}_j \tilde{\mathbf{P}}_j^{(1)} \hat{\mathbf{H}}_j^T + \mathbf{R}_j; \quad \mathbf{G}_j^{(2)} = \hat{\mathbf{F}}_j \tilde{\mathbf{P}}_j^{(2)} \hat{\mathbf{F}}_j^T + \mathbf{Q}_j, \quad (15)$$

где $\hat{\mathbf{H}}_j = (\mathbf{H}_j + \tilde{\mathbf{H}}_j)/2$, $\hat{\mathbf{F}}_j = (\mathbf{F}_j + \tilde{\mathbf{F}}_j)/2$.

Шаг 9. Вычислить оптимальные по Калману матрицу коэффициентов усиления

$\mathbf{S}_j^{(1)} = \tilde{\mathbf{P}}_j^{(1)} \hat{\mathbf{H}}_j^T [\mathbf{G}_j^{(1)}]^{-1}$, $\mathbf{S}_j^{(2)} = \tilde{\mathbf{P}}_j^{(2)} \hat{\mathbf{F}}_j^T [\mathbf{G}_j^{(2)}]^{-1}$ и

произвести коррекцию оценок $\hat{X}_{j+1}^{(1)}$ и $\hat{X}_{j+1}^{(2)}$:

$$\hat{X}_{j+1}^{(1)} = \hat{X}_{j+1}^{(1)} + \mathbf{S}_j^{(1)} \bar{Z}_j^{(1)}; \quad \hat{X}_{j+1}^{(2)} = \hat{X}_{j+1}^{(2)} + \mathbf{S}_j^{(2)} \bar{Z}_j^{(2)}. \quad (16)$$

Шаг 10. Выполнить итоговую оценку $\hat{\bar{X}}_j$ по правилу (10).

Шаг 11. Увеличить $j = j + 1$ и проверить условия:

а) если $j < N$, то рассчитать ковариационную матрицу оценки вектора состояния по

правилу (11) для $\mathbf{P}_j^{(1)} = (\mathbf{E} - \mathbf{S}_{j-1}^{(1)} \hat{\mathbf{H}}_{j-1}) \tilde{\mathbf{P}}_{j-1}^{(1)}$,

$\mathbf{P}_j^{(2)} = (\mathbf{E} - \mathbf{S}_{j-1}^{(2)} \hat{\mathbf{F}}_{j-1}) \tilde{\mathbf{P}}_{j-1}^{(2)}$ ($\mathbf{E}$ – единичная

матрица размера $K \times K$) и перейти к шагу 4;

б) если $j = N$, то завершить работу алгоритма и вывести результат вычисления –

$\hat{\bar{X}}_0, \hat{\bar{X}}_1, \dots, \hat{\bar{X}}_{N-1}$.

3. Результаты вычислительного эксперимента

Для апостериорной верификации сформированного алгоритмического решения приведем примеры моделирования и оценивания стохастической модели информационного противоборства вида (3), (4) и (5) при $K = 2$. Для оценки результативности алгоритма выполним сравнение данных моделирования и оценивания с точным решением $\bar{X}^0 = (x_k^0)_K$, получаемом из модели информационного противоборства вида:

$$\frac{dx_k^0}{dt} = [\alpha_k^0 + \beta^0 x_k^0] \left[N_0 - \sum_{k'=1}^2 x_{k'}^0 \right] - \gamma_k^0 x_k^0, \quad x_k^0(0) = 0, \quad k = [1; 2], \quad (17)$$

где $\alpha_1^0(t) = 0,5|1 + \cos(10t)|$;

$\alpha_2^0(t) = 0,6|1 + \sin(5t)|$;

$\beta^0(t) = 0,01|1,5 + \cos(0,01t)|$;

$\gamma_1^0(t) = 0,05|\sin(20t)|$;

$\gamma_2^0(t) = 0,1|\cos(3t)|$.

Вычисление (17) производится по аналогии с (12) методом Эйлера для аналогичных N .

Для модели (3) наблюдаемые интенсивности α_k , β , γ_k определим по следующим правилам:

$\alpha_k(t) = |\alpha_k^0(t) + \aleph(0, q)|$, $\beta(t) = |\beta^0(t) + \aleph(0, q)|$,

$\gamma_k(t) = |\gamma_k^0(t) + \aleph(0, q)|$,

где $\aleph(0, q)$ – функция генерации случайных чисел, подчиняющихся нормальному закону распределения со средним 0 и дисперсией $q = 0,5$.

Для модели (4) наблюдаемые интенсивности A_k , B , Γ_k зададим по следующим правилам:

$$A_k(t) = |\alpha_k^0(t) - \Re[r^{-1}/2]|,$$

$$B(t) = |\beta_k^0(t) - \Re[r^{-1}/2]|,$$

$$\Gamma_k(t) = |\gamma_k^0(t) - \Re[r^{-1}/2]|,$$

где $\Re[r^{-1}/2]$ – функция генерации случайных чисел, подчиняющихся экспоненциальному закону распределения со значением показателя экспоненты равным $(2r)^{-1}$ при $r = 0,5$.

Остальные входные данные алгоритма заданы следующими значениями: $T_0 = 4$, $N = 400$, $N_0 = 10$.

На рис. 1 приведены графики зависимости от времени элементов векторов численности адептов: 1) истинного $\bar{X}^0$; 2) определяемого среднего $\bar{X} = (\bar{X} + \bar{Y})/2$ из моделей (3), (4); 3) оцениваемого $\hat{\bar{X}}$ по разработанному алгоритму.

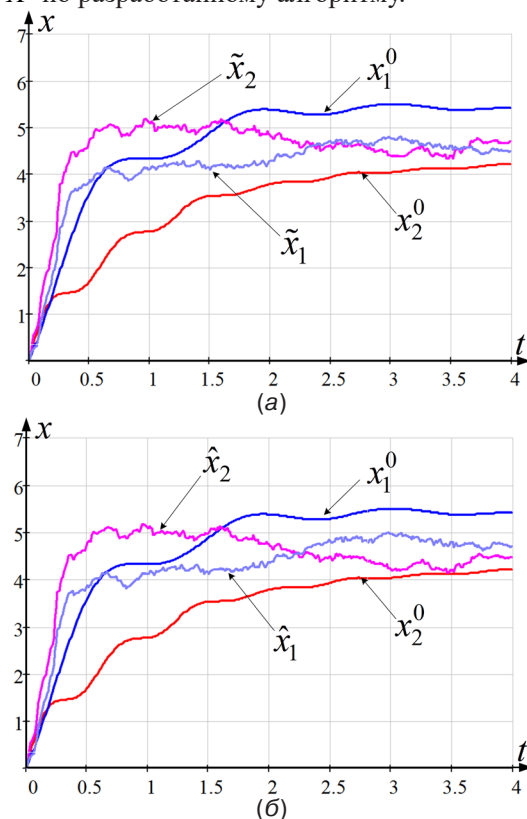


Рис. 1. Графики зависимости элементов векторов

$\bar{X}^0$, $\tilde{\bar{X}}$ (а) и $\bar{X}^0$, $\hat{\bar{X}}$ (б) от t

На рис. 2 отражены графики зависимости элементов матрицы $\mathbf{P}$ от t .

Сравнительная предпочтительность получаемых результатов $\bar{X}$, $\tilde{\bar{X}}$ по отношению к $\bar{X}^0$ определялась величиной накопленной средней квадратической ошибки, значение которой, например, для $\tilde{\bar{X}}$ вычисляется по

правилу $\Delta_{\tilde{\bar{X}}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} |\tilde{\bar{X}}_j - \bar{X}_j^0|^2}$. Также срав-

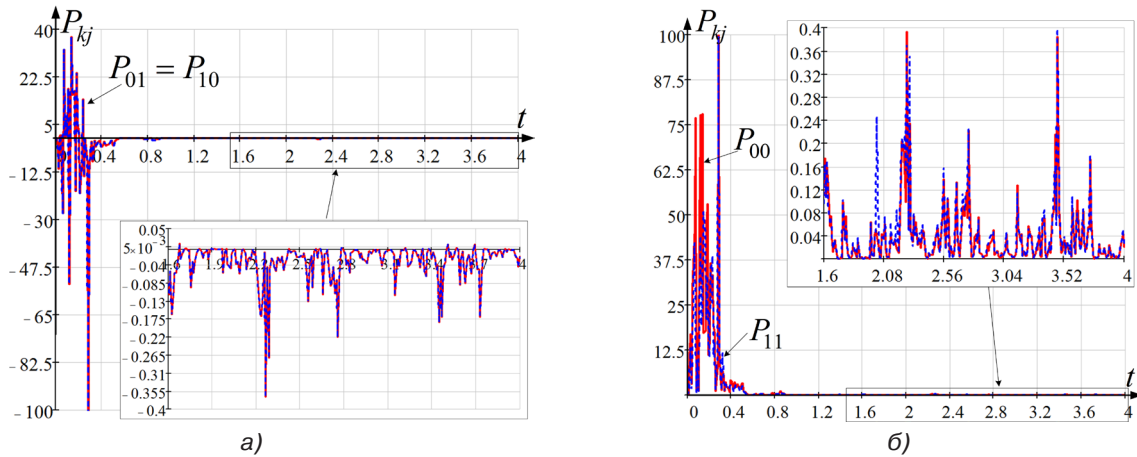


Рис. 2. Графики зависимости элементов P_{10} , P_{01} (а), P_{00} , P_{11} (б) матрицы $\mathbf{P}$ от t

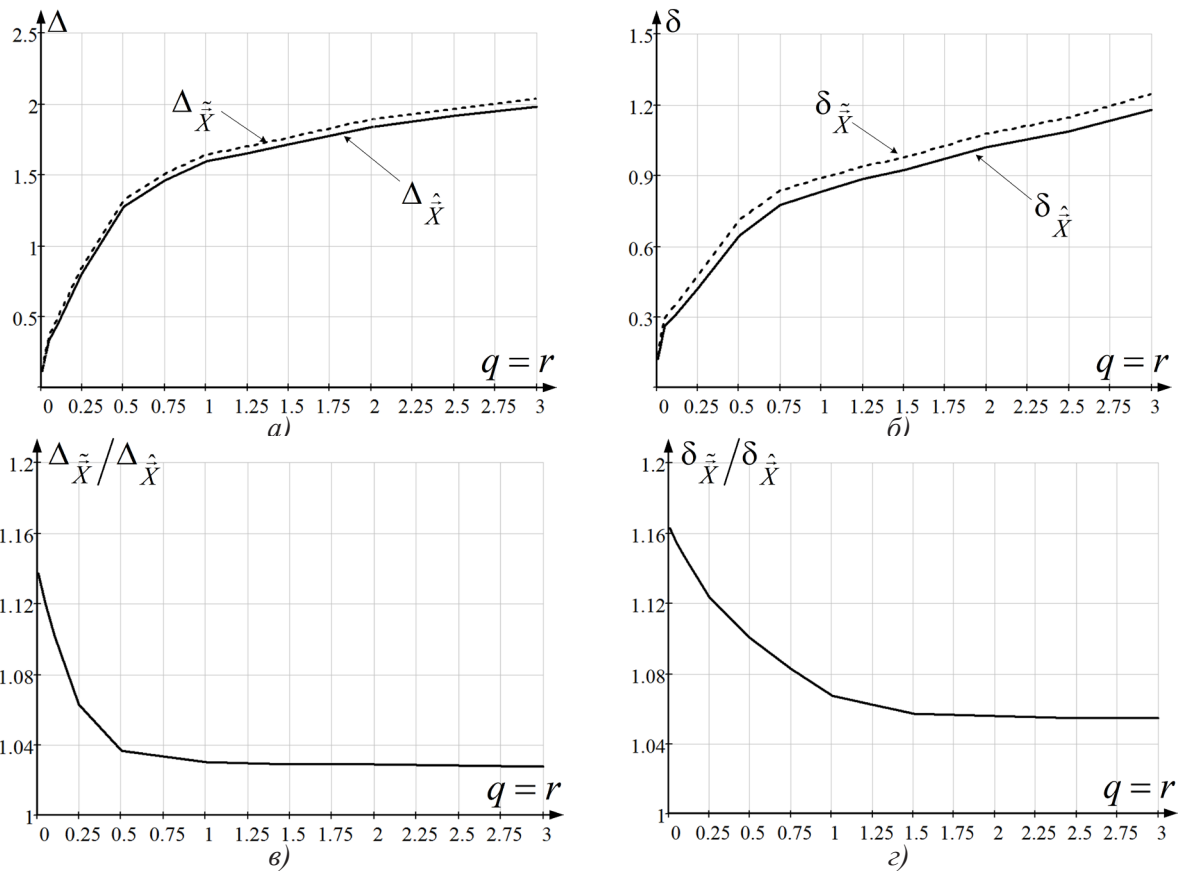


Рис. 3. Графики зависимости $\Delta_{\tilde{X}}$, $\Delta_{\hat{X}}$ (а, в), $\delta_{\tilde{X}}$, $\delta_{\hat{X}}$ (б, г) от r, q при $r = q$

нение осуществлялось при определении отклонения расчетного от истинного значения для

момента времени $t = T_0$: $\delta_{\tilde{X}} = |\tilde{X}_{N-1} - \bar{X}_{N-1}^0|$.

Для проведенного расчета (рис. 1) значения Δ и δ

составили: $\Delta_{\tilde{X}} = 1,035$; $\delta_{\tilde{X}} = 1,484$; $\Delta_{\hat{X}} = 0,749$; $\delta_{\hat{X}} = 1,366$.

На рис. 3 представлены графики зависимости усредненных по 10^6 вычислительным экспериментам $\Delta_{\tilde{X}}$, $\delta_{\tilde{X}}$, $\Delta_{\hat{X}}$, $\delta_{\hat{X}}$ от r, q при $r = q$.

Заключение

Результаты апостериорных исследований проведенных вычислительных экспериментов (рис. 1–3) подтверждают работоспособность и предпочтительность сформированного алгоритмического решения в задаче фильтрации стохастических моделей информационного противоборства. Относительный выигрыш в сравнении со значениями, получаемыми по средневыворочным правилам наблюдения, в среднем составляет 5,5 % (рис. 3). Большой выигрыш по параметрам $\delta_{\hat{X}}$, $\delta_{\hat{Y}}$ (рис. 3,б и 3,г) в сравнении с $\Delta_{\hat{X}}$, $\Delta_{\hat{Y}}$ (рис. 3,а и 3,в) связан с существенным уменьшением ошибки при увеличении числа отсчетов (рис. 2). Рост вычислительных затрат, обусловленных применением линейной модели фильтра, является несущественным для современных средств вычислительной техники.

Алгоритм применим при наличии неопределенности в предпочтительности разнородных правил измерения соответствующих интенсивностей α_k , γ_k в модели (1). При наличии более двух разнородных правил подобного наблюдения, сформированный алгоритм без особого труда может быть обобщен в представлениях ансамблевого фильтра Калмана [17].

Увеличение относительного выигрыша возможно при разработке нелинейной модели фильтра вида [11], предполагающего реализацию рекурсивной схемы [19] оценивания $\hat{X}$. Для составления вычислительно устойчивого решения подобной задачи в сравнении с [11] нелинейный фильтр целесообразно формировать на основе численного решения робастного уравнения Дункана–Мортенсена–Закаи [20].

Литература

1. Михайлов А.П., Петров А.П. Ч. Математические модели системы «человек-общество». М.: Физматлит. 2022. 456 с.
2. Губанов Д.А., Новиков Д.А., Чхартишвили А.Г. Социальные сети: модели информационного влияния, управления и противоборства. М.: Физматлит. 2010. 228 с.
3. Бызов Л.Г., Губанов Д.А., Козицин И.В., Чхартишвили А.Г. Идеальный политик для социальной сети: подход к анализу идеологических предпочтений пользователей // Проблемы управления. 2020. №4. С.15-26. DOI: 10.25728/ru.2020.4.2
4. Михайлов А.П., Петров А.П., Прончева О.Г. Модель информационного противоборства в социуме с кусочно-постоянной функцией дестабилизирующего воздействия // Математическое моделирование. 2018. Т. 30, № 7. С. 190-197. DOI: mi.mathnet.ru/mm3984.
5. Михайлов А.П., Петров А.П., Маревцева Н.А., Третьякова И.В. Развитие модели распространения информации в социуме // Математическое моделирование. 2014. Т. 26 №. 3. С. 65-74. DOI: mi.mathnet.ru/mm3459.
6. Полянский И.С., Логинов К.О., Ильин Н.И., Великих А.С. Математическая модель оценки информационного воздействия на электорат в социальных медиа при проведении выборных кампаний // Математическое моделирование. 2022. Т. 33, № 12. С. 590-598. DOI: mi.mathnet.ru/mm4341.
7. Ильинский А.С., Полянский И.С., Логинов К.О., Архипов Н.С. К вопросу численной оценки информационного воздействия на электорат при проведении выборных кампаний // Прикладная Математика и информатика: Труды факультета ВМК МГУ им. М.В. Ломоносова. М.: МАКС Пресс. 2021. Т. 68. С.15-28.
8. Полянский И.С., Полянская И.В., Логинов К.О. Алгоритмические решения в задаче оценки информационного воздействия на электорат при проведении выборных кампаний // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2021. Т. 24. № 4. С. 72-80. DOI: 10.18469/1810-3189.2021.24.4.72-80.
9. Пугачев В.С., Синицин И.Н. Стохастические дифференциальные системы. Анализ и фильтрация. Изд. 2-е. М.: Наука. 1990. 642 с.
10. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. М.: Радио и связь. 1983. 320 с.
11. Логинов К.О. Численное решение задачи фильтрации оценок информационного воздействия на электорат // Информатика и автоматизация. 2022. Вып. 21. Т. 3. С. 624-652. DOI: 10.15622/ia.21.3.7.
12. Рыбаков К.А. Приближенное решение задачи оптимальной нелинейной фильтрации для стохастических дифференциальных систем методом статистических испытаний // Сибирский журнал вычислительной математики. 2013. Т. 16. № 4. С. 377-391. DOI: mi.mathnet.ru/sjvm525
13. Логинов К.О. Оценка интенсивности информационного влияния социальных медиа при проведении предвыборной кампании // Сборник материалов IX Международной научно-практической конференции «Современные проблемы цивилизации и устойчивого развития в информационном обществе». 2022. С. 173–179.
14. Amirhossein Taghvaei, Jana de Wiljes, Prashant G. Mehta, Sebastian Reich. Kalman filter and

- its modern extensions for the continuous-time nonlinear filtering problem // *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*. 2018. 140(3). DOI: 10.1115/1.4037780
15. Полянский И.С., Полянская И.В., Фам Т.З. Математическая модель фильтрации канонических параметров спутника-ретранслятора при орбитальном движении // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2019. Т. 22, № 4. С. 50-57. DOI: 10.18469/1810-3189.2019.22.4.50-57
 16. Полянский И.С., Фам Т.З., Тихонов А.В., Катыгин Б.Г. Алгоритм фильтрации координат наземного источника несанкционированного радиоизлучения в системе спутниковой связи с прямой ретрансляцией // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2021. Т. 24, № 1. С. 67-77. DOI: 10.18469/1810-3189.2021.24.1.67-77
 17. Bergemann K., Reich S. An ensemble Kalman-Bucy filter for continuous data assimilation // *Meteorologische Zeitschrift*. 2012. V. 21. P. 213-219. DOI: 10.1127/0941-2948/2012/0307
 18. Полянский И.С., Патронов Д.Ю. Максимально правдоподобная оценка дисперсионно-ковариационной матрицы // *Современные проблемы науки и образования*. 2013. № 1. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=8516>
 19. Полянский И.С., Архипов Н.С., Мисюрин С.Ю. О решении проблемы оптимального управления адаптивной многолучевой зеркальной антенной // *Автоматика и телемеханика*. 2019. № 1. С. 83-100. DOI: 10.1134/S0005231019010069
 20. Wenhui Dong, Xue Luo, Stephen S.-T. Yau. Solving Nonlinear Filtering Problems in Real-time by Legendre Galerkin Spectral Method // *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2020. V 66. Issue 4. P. 1559–1572. DOI: 10.1109/TAC.2020.3002979

Полянский Иван Сергеевич Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации, г. Орел, Россия. Доктор физико-математических наук. Доцент. Количество печатных работ: 152. Область научных интересов: математическое моделирование, динамические системы, дифференциальные уравнения, методы оптимизации, оптимальное управление, конформные отображения, вычислительная электродинамика, цифровая обработка сигналов. E-mail: van341@mail.ru

Логинов Кирилл Олегович Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации, г. Орел, Россия. Сотрудник. Количество печатных работ: 10. Область научных интересов: математическое моделирование, методы статистического анализа данных, динамические системы, оптимальное управление, стохастические дифференциальные уравнения. E-mail: kvirs@mail.ru

Algorithmic solutions problem of filtering in stochastic model of information confrontation

I.S. Polyanskii, K.O. Loginov

The Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation, Orel, Russia

Abstract: In the article, a stochastic model of filtering estimates of information warfare is proposed in the development of models of information warfare in a structured society. The model of information confrontation in a one-group society with a one-stage transition of individuals to adherents is considered for the simplicity of presenting the formed solutions of filtering assessments. If there are several heterogeneous rules for measuring the parameters of the information warfare model, the formed solution is applicable. Algorithmic solutions are based on the model of an ensemble extended Kalman filter. The main stages of the algorithmic implementation of the compiled stochastic model of filtering estimates of information warfare have been clarified. When conducting a series of computational experiments for specific text tasks, the operability and preference of the results obtained were verified.

Keywords: *evaluation of information impact, stochastic models of information confrontation, ensemble extended Kalman filter, algorithm, stochastic differential equation.*

DOI: 10.14357/20790279230208

References

1. *Mihajlov A.P., Petrov A.P.CH.* Matematicheskie modeli sistemy «chelovek-obshchestvo» [Mathematical models of the «man-society» system]. Moscow: Fizmatlit [Physical and mathematical literature], 2022, 456 p.
2. *Gubanov D.A., Novikov D.A., Chkhartishvili A.G.* Social'nye seti: modeli informacionnogo vliyaniya, upravleniya i protivoborstva [Social networks: models of information influence, management and confrontation]. – Moscow: Fizmatlit [Physical and mathematical literature], 2010, 228 p.
3. *Byzov L.G., Gubanov D.A., Kozitsin I.V., Chkhartishvili A.G.* A Perfect Politician for Social Networks: an Approach to Analyzing Ideological Preferences of Users. *Automation and Remote Control*, 2021. 82: 1614-1631. DOI: 10.1134/S0005117921090095
4. *Mikhailov A.P., Petrov A.P., Proncheva O.G.* A Model of Information Warfare in a Society with a Piecewise Constant Function of the Destabilizing Impact. *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2018. 11: 190-197. DOI: 10.1134/S2070048219020108.
5. *Mikhailov A.P., Petrov A.P., Marevtseva N.A., Tretiakova N.A.* Development of a model of information dissemination in society. *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2014. 26(3): 65-74. DOI: 10.1134/S2070048214050093.
6. *Poljanskij I.S., Loginov K.O., Ilyin N.I., Velikikh A.S.* Mathematical Model for Assessing the Information Impact on the Electorate in Social Media during Election Campaigns. *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2022. 14: 590-598. DOI: 10.1134/S207004822204007X.
7. *Il'inskii A.S., Polyanskii I.S., Loginov K.O., Arkhipov N.S.* Numerical Assessment of the Information-
- al Influence of Election Campaigns on the Electorate. *Computational Mathematics and Modeling*, 2021. 32(13): 399-412. DOI: 10.1007/s10598-022-09542-5.
8. *Polyanskij, I.S., Polyanskaya, I.V., Loginov, K.O.* Algoritmicheskie resheniya v zadache ocenki informacionnogo vozdejstviya na elektorat pri provedenii vybornykh kampanij [Algorithmic solutions to the problem of assessing the information impact on the electorate during election campaigns] // *Fizika volnovykh processov i radiotekhnicheskie sistemy* [Physics of wave processes and radio engineering systems], 2021. 24(4): 72-80.
9. *Pugachev V.S., Sinicin I.N.* Stokhasticheskie differencial'nye sistemy. Analiz i fil'traciya. Izd. 2-e [Stochastic differential systems. Analysis and filtering. 2nd Ed.]. – Moscow : Nauka [Science], 1990, 642 p.
10. *Tihonov V.I.* Optimal'nyj priem signalov [Optimal signal reception]. Moscow: Radio i svyaz' [Radio and communications], 1983, 320 p.
11. *Loginov K.O.* Chislennoe reshenie zadachi fil'tracii ocenok informacionnogo vozdejstviya na elektorat [Numerical solution of the problem of filtering estimates of information impact on the electorate]. *Informatika i avtomatizaciya* [Computer Science and automation], 2022. 21(3): 624-652. DOI: 10.15622/ia.21.3.7.
12. *Rybakov K.A.* Solving approximately an optimal nonlinear filtering problem for stochastic differential systems by statistical modeling. *Numerical Analysis and Applications*, 2013. 6: 324-391. DOI: 10.1134/S1995423913040071
13. *Loginov K.O.* Ocenka intensivnosti informacionnogo vliyaniya social'nykh media pri provedenii predvybornoj kampanii [Assessment of the

- intensity of the informational influence of social media during the election campaign] // Sbornik materialov IX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Sovremennye problemy civilizatsii i ustojchivogo razvitiya v informacionnom obshchestve» [Collection of materials of the IX International Scientific and Practical Conference “Modern problems of civilization and sustainable development in the information society”], 2022: 173–179.
14. *Amirhossein Taghvaei, Jana de Wiljes, Prashant G. Mehta, Sebastian Reich*. Kalman filter and its modern extensions for the continuous-time nonlinear filtering problem. *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, 2018. 140(3). DOI: 10.1115/1.4037780
 15. *Polyanskij I.S., Polyanskaya I.V., Fam T.Z.* Matematicheskaya model' fil'tracii kanonicheskikh parametrov sputnika-retranslyatora pri orbital'nom dvizhenii [Mathematical model of filtering canonical parameters of a relay satellite during orbital motion] // *Fizika volnovykh processov i radiotekhnicheskie sistemy* [Physics of wave processes and radio engineering systems], 2019. 22(4): 50-57. DOI: 10.18469/1810-3189.2019.22.4.50-57
 16. *Polyanskij I.S., Fam T.Z., Tihonov A.V., Katygin B.G.* Algoritm fil'tracii koordinat nazemnogo istochnika nesankcionirovannogo radioizlucheniya v sisteme sputnikovoy svyazi s pryamoj retranslyaciej [Algorithm for filtering coordinates of a ground source of unauthorized radio emission in a satellite communication system with direct retransmission] // *Fizika volnovykh processov i radiotekhnicheskie sistemy* [Physics of wave processes and radio engineering systems], 2021. 24(1): 67-77. DOI: 10.18469/1810-3189.2021.24.1.67-77
 17. *Bergemann K., Reich S.* An ensemble Kalman-Bucy filter for continuous data assimilation. *Meteorologische Zeitschrift*, 2012. 21: 213-219. DOI: 10.1127/0941-2948/2012/0307
 18. *Polyanskij I.S., Patronov D.YU.* Maksimal'no pravdopodobnaya ocenka dispersionno-kovariatsionnoy matritsy [The most plausible estimate of the variance-covariance matrix] // *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2013. 1; Available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=8516>
 19. *Polyanskii I.S., Arkhipov N.S., Misyurin S.Yu.* On Solving the Optimal Control Problem Automation and Remote Control, 2019. 80: 66–80. DOI: 10.1134/S0005117919010065
 20. *Wenhui Dong, Xue Luo, Stephen S.-T. Yau.* Solving Nonlinear Filtering Problems in Real-time by Legendre Galerkin Spectral Method // *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2020, vol. 66, issue 4, pp. 1559–1572. DOI: 10.1109/TAC.2020.3002979

Polyansky Ivan Sergeevich, doctor of physical and mathematical sciences, associate professor, employee of the Academy Federal Security Service Russian Federation, Orel, Russia. The number of scientific publications is 152. Research interests: mathematical modeling, dynamical systems, differential equations, optimization methods, optimal control, conformal mappings, computational electrodynamics, digital signal processing. E-mail: van341@mail.ru ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1282-1522>

Loginov Kirill Olegovich, employee of the Academy Federal Security Service Russian Federation, Orel, Russia. Author of 10 scientific publications. Research interests: mathematical modeling, methods of statistical data analysis, dynamic systems, optimal control, stochastic differential equations. E-mail: kvirs@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8715-6029>

Синтез управлений нелинейным динамическим объектом с ограниченными возмущениями и использованием SDC-метода*

ЛАДЖАЛ БРАХИМ

Московский институт электроники и математики, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва, Россия

Аннотация. Проблема оптимального управления при действии ограниченных возмущений формулируется для класса динамических систем, нелинейные объекты которых представимы в виде объектов с линейной структурой и параметрами, зависящими от состояния. Введенный квадратичный функционал позволяет рассматривать поставленную задачу с привлечением методов дифференциальных игр с нулевой суммой. Линейность структуры преобразованной нелинейной системы и квадратичный функционал качества позволяют при синтезе оптимальных управлений, т.е. параметров регуляторов, перейти от необходимости поиска решений уравнения Беллмана-Айзекса к уравнению типа Риккати с параметрами, зависящими от состояния. Синтезированные управления обеспечивают SDC-модели свойство асимптотической устойчивости и позволяют определить соотношение наложенных на управления ограничений, при котором обеспечивается условие существования дифференциальной игры с нулевой суммой. Основная проблема реализации оптимального управления связана с проблемой поиска решения уравнения Риккати с параметрами, зависящими от состояния, в темпе функционирования объекта. Для решения этого уравнения в работе предложен метод субоптимальных управлений с квазистационарными значениями параметров. Дана оценка расхождения оптимального и субоптимального решений. В качестве иллюстрации полученных результатов приведено моделирование поведения нелинейной системы с двумя игроками с открытым горизонтом управления.

Ключевые слова: метод расширенной линеаризации, уравнение Беллмана-Айзекса, уравнение Риккати с параметрами, зависящими от состояния.

DOI: 10.14357/20790279230209

Введение

Теория дифференциальных игр, как направление математической теории управления тесно связана с математической теорией оптимальных процессов, теорией игр, вариационным исчислением и теорией дифференциальных уравнений. Становление теории дифференциальных игр связано с именами Р. Айзекса [1], Л.С.Понтрягина [2, 3], Е.Ф. Мищенко [4], Б.Н. Пшеничного [5], Красовский Н.Н. [6] и многих других зарубежных и советских ученых. Начиная с работ А. Брайсона [7] дифференциальные игры с ненулевой суммой стали рассматриваться как задачи теории оптимального управления. В задачах дифференциальной игры с заданным интервалом управления с

нулевой суммой и квадратичным функционалом качества синтез оптимальных управлений приводит при их реализации к необходимости решать в темпе функционирования объекта скалярное дифференциальное уравнение в частных производных Беллмана-Айзекса [8–10] с коэффициентами, зависящими от состояния объекта.

В настоящей статье задача дифференциальной игры с ограниченными возмущениями и возможностью представления исходной динамической системы с помощью SDC-метода [9,11] (*StateDependentCoefficient*, SDC) рассматривается для двух случаев: с заданным интервалом управления и с открытым интервалом управления. Квадратичный функционал и использование SDC-модели исходной системы позволяют перейти от необходимости поиска решений скалярного дифференциально-

* Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований (Проект 19-8-00535).

го уравнения в частных производных (уравнение Беллмана-Айзекса) к матричному уравнению типа Риккати с параметрами, зависящими от состояния. Решение этого уравнения в темпе функционирования системы в общем случае является сложной задачей. В ряде случаев для решения такого уравнения можно использовать пакеты прикладных символьных исчислений (*Mathematica*, *Piton*). Для получения реализуемых решений в виде квазиоптимальных управлений в статье предложен метод, основанный на поиске параметров субоптимального регулятора для каждого (заданного) временного шага интервала управления (метод замороженных параметров уравнения). Этот метод можно отнести к методам, изложенным в [12] (*FrozenRiccatiEquation*, *FRE*).

Материал статьи представлен следующим образом. В первом разделе осуществлена постановка задачи дифференциальной игры с квадратическим функционалом качества. Обосновывается условие представления исходной динамической системы управления ее SDC-моделью.

Во втором разделе отдельно рассматриваются задачи с заданным и открытым интервалах управления. Производится синтез управлений, доказываются их оптимальность. Определяются условия существования решения дифференциальной игры с нулевой суммой.

Для получения реализуемых решений в виде квазиоптимальных управлений в третьем разделе статьи предложен метод, основанный на поиске параметров субоптимального регулятора для каждого (заданного) временного шага интервала управления. Дана оценка расхождения оптимального и субоптимального решений.

В четвертом разделе в качестве иллюстрации полученных результатов приведено моделирование поведения нелинейной системы с двумя игроками с открытым горизонтом управления.

1. Задача управления и SDC-модель системы

1.1. Формулировка задачи управления в общем виде

Уточним постановку задачи, рассмотрев динамическую детерминированную нелинейную систему:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}x(t) &= f(x(t)) + g_1(x(t))w(t) + \\ &+ g_2(x(t))u(t), x(t_0) = x_0, \\ y(t) &= Cx(t). \end{aligned} \quad (1.1)$$

Здесь $x(t) \in \Omega_x \subset R^n$ – состояние системы; $X_0 \in \Omega_x$ – множество возможных начальных условий системы; $y(t) \in R^m, m \leq n$ – выход систе-

мы; $u(t) \in U \subset R^r$ – управление; $w(t) \in W \subset R^k$ – возмущение; $f(x(t)), g_1(x(t)), g_2(x(t))$ – непрерывные матрицы-функции. Предполагается, что для всех x система (1.1) управляема и наблюдаема, $t \in R^+$. Кроме того, будем полагать, что функции $f(x(t)), g_1(x(t)), g_2(x(t))$ достаточно гладкие (C_∞) такие, что их любых $(t_0, x_0) \in R_+ \times \Omega_x$ проходило бы одно и только одно решение уравнения (1.1) $x(t, t_0, x_0)$ и был бы единственным соответствующий выход системы $y(t) = Cx(t, x_0)$.

Предполагается, что неконтролируемое возмущение $w(t)$, которое может быть как детерминированным, так и стохастическим, характеризуется следующим отношением:

$$|w(t)| \leq \sigma(x(t)), \forall t \geq 0, \quad (1.2)$$

где $|w_i(t)| \leq \sigma_i(x(t)), i = \overline{1, k}, t \geq 0, \sigma_i(x(t)) \geq 0$ для всех $x(t) \in \Omega_x$. Запишем (1.1) в виде $w(t) \in W$.

Рассматривая возмущение $w(t)$, как действие некоторого игрока противодействующему успешному выполнению задачи управления, сформулируем задачу управления в ключе дифференциальной игры двух игроков G_u и G_w . Организация управлений $u(t) \in U$ и $w(t) \in W$ будет осуществляться с использованием принципа обратной связи по состоянию.

Введем функционал качества дифференциальной игры:

$$\begin{aligned} J(x, u, w) &= \frac{1}{2} y^T(t_f) F y(t_f) + \\ &+ \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} \{ y^T(t) Q y(t) + u^T(t) R u(t) - \\ &- w^T(t) P w(t) \} dt. \end{aligned} \quad (1.3)$$

Здесь симметрические матрицы Q и F , по крайней мере, положительно полуопределенные. Ограничения на управляющие воздействия будем учитывать при назначении положительно определенных матриц P и R . Дополнительные требования к значениям параметров матриц R и P будут определены ниже.

Задача заключается в построении оптимальной стратегии с обратной связью для игроков G_u и G_w . Другими словами, задача заключается в нахождении управляющего воздействия $u(t)$ для объекта (1.1), минимизирующего функционал вида (1.3) при соответствующем противодействии «управления» $w(t)$.

1.2. SDC-модель системы

Представим систему (1.1) в несколько ином, эквивалентном виде. Для этого используем метод «расширенной линеаризации» или SDC-параметризации (*StateDependentCoefficient*, [10]).

Предположение 1.1. Вектор-функция $f(t, x)$ – непрерывная дифференцируемая по $x \in \Omega_x$, т.е. $f(\cdot) \in C^1(\Omega_x)$ и $g_1(\cdot), g_2(\cdot) \in C^0(\Omega_x)$.

Предположение 1.2. Без потери общности положим, что условие $x = 0 \in \Omega_x$ есть точка равновесия системы при $u = 0, w = 0$ так, что $f(0) = 0$ и $g_1(x(t)) \neq 0, g_2(x(t)) \neq 0, \forall x \in \Omega_x$.

При выполнении сделанных предположений можно записать:

$$f(x(t)) = A(x(t))x(t). \quad (1.4)$$

Естественно, такое представление $f(x(t))$ при $n > 1$, в виде (1.4) не является единственным [10].

Определение 1.1. Представление системы (1.1) в виде модели

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}x(t) &= A(x(t))x(t) + g_1(x(t))w(t) + g_2(x(t))u(t), x(0) = x_0, \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (1.5)$$

является эквивалентным если матрицы $\langle A(x(t)), g_1(x(t)) \rangle$ и $\langle A(x(t)), g_2(x(t)) \rangle$ образуют управляемые пары, а матрицы $\langle A(x(t)), C \rangle$ образуют наблюдаемую пару при всех возможных $(t, x) \in T \times \Omega_x$.

Определение 1.2. Будем называть представление нелинейной управляемой системы (1.1) в виде модели (1.5) SDC-представлением.

Предположение 1.3. $A(\cdot), B(\cdot), g_1(\cdot), g_2(\cdot)$ – матрицы $C^1(R^n)$ действительных переменных.

Предположение 1.4. SDC-представление нелинейной системы (1.1) в виде модели (1.5) является стабилизируемым (управляемым) в области $T \times \Omega_x$, если пары $\langle A(x(t)), g_1(x(t)) \rangle$, $\langle A(x(t)), g_2(x(t)) \rangle$ стабилизируемы (управляемы) в линейном смысле для $(t, x) \in T \times \Omega_x$, т.е.

$$\begin{aligned} \text{rank}[g_1(x(t))A(x(t))g_1(x(t))A^2(x(t))g_1(x(t))\dots A^{n-1}(x(t))g_1(x(t))] &= n, \\ \text{rank}[g_2(x(t))A(x(t))g_2(x(t))A^2(x(t))g_2(x(t))\dots A^{n-1}(x(t))g_2(x(t))] &= n. \end{aligned}$$

2. Синтез оптимальных и субоптимальных управлений

2.1. Задача с заданным временем переходного процесса

Решение задачи (1.1)-(1.3) существует на множестве Ω_x , если существует непрерывная положительно определенная функция $V: \Omega_x \rightarrow R^+$:

$$V(t, x) \triangleq \min_u \max_w J(x, u, w) \quad (2.1)$$

для всех $x \in \Omega_x$ и допустимых управлений $u(t) \in U$ и $w(t) \in W$ [9, 10].

В общем случае значение назначаемой функции V есть решение задачи динамического программирования, связанное с дифференциальным уравнением первого порядка в частных производных Гамильтона-Якоби-Айзекса:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V(t, x)}{\partial t} + \min_u \max_w H\{x, u, w, \frac{\partial V(t, x)}{\partial x(t)}\} &= 0, V(T, x(T)) = \\ \frac{1}{2}x^T(T)C^TFCx(T), \end{aligned} \quad (2.2)$$

где H – гамильтониан

$$\begin{aligned} H &= \left\{ \frac{\partial V(t, x)}{\partial x(t)} \{ [f(x) + g_1(x)w(t) + g_2(x)u(t)] + \right. \\ &\left. + \frac{1}{2}x^T(t)C^TQCx(t) + u^T(t)Ru(t) - w^T(t)Pw(t) \} \right\}. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Оптимальное решение определяется выражением двухточечной краевой задачи [8,9]:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}x(t) &= [\partial H(x, u, w, \lambda)/\partial x(t)]^T, x(t_0) = x_0, \\ \frac{d}{dt}\lambda(t) &= -[\partial H(x, u, w, \lambda)/\partial x(t)]^T, \lambda(t_f) = \lambda_T, \\ \partial H(x, u, w, \lambda)/\partial u(t) &= 0, \partial H(x, u, w, \lambda)/\partial w(t) = 0. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Оптимальные управления определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} \left\{ \frac{\partial H}{\partial w(t)} \right\}^T &= -Pw(t) + g_1^T(x(t))\lambda(t) = 0, \\ \left\{ \frac{\partial H}{\partial u(t)} \right\}^T &= Ru(t) + g_2^T(x(t))\lambda(t) = 0, \\ \frac{\partial^2 H}{\partial w^2(t)} &= -P < 0, \frac{\partial^2 H}{\partial u^2(t)} = R > 0. \end{aligned}$$

Откуда

$$w(t) = P^{-1}g_1^T(x(t))\lambda(t), u(t) = -R^{-1}g_2^T(x(t))\lambda(t). \quad (2.5)$$

Управления (2.5) описывают стратегию с обратной связью для игроков G_u и G_w как функции текущего состояния.

Модель (1.5) системы (1.1) с управлениями (2.5) принимает вид:

$$\frac{d}{dt}x(t) = A(x(t))x(t) - P(x(t))\lambda(t), x(t_0) = x_0,$$

$$y(t) = Cx(t), \quad (2.6)$$

где

$$P(x(t)) = g_2(x(t))R^{-1}g_2^T(x(t)) - g_1(x(t))P^{-1}g_1^T(x(t)). \quad (2.7)$$

Предположение 2.1. Симметрическая матрица (2.7) при всех $x \in \Omega_x$, по крайней мере, положительно полуопределенная.

Справедливость Предположения 2.1 обеспечивается соответствующим назначением матриц R и P . Действительно, так как в силу задачи на систему действуют ограниченные возмущения $|w(t)| \leq \sigma(x(t)), \forall t \geq 0$, то матрицу штрафа P в функционале (1.3) для игрока G_w разумно назначить в виде: $P = 1/\sigma(x(t))$. Тогда матрицу R следует назначать так, чтобы выполнялось Предположение 2.1.

Вспомогательная переменная $\lambda(t)$ и ее краевое значение $\lambda(T)$ будут определяться соотношениями:

$$\frac{d}{dt} \lambda(t) = \frac{d}{dt} \left\{ \frac{\partial V(t, x)}{\partial x} \right\}^T = - \left\{ \frac{\partial H}{\partial x} \right\}^T =$$

$$= - \left\{ \frac{\partial A(x(t))x(t)}{\partial x} \right\}^T \lambda(t) - C^T Q C x(t) - \left[\frac{\partial \Pi(x(t))}{\partial x} \right]^T \lambda(t), \quad (2.8)$$

Здесь

$$\frac{\partial A(x(t))x(t)}{\partial x} = A(x(t)) + \begin{bmatrix} \frac{\partial A_{1*}(x(t))}{\partial x_1} & \dots & \dots & \frac{\partial A_{1*}(x(t))}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial A_{n*}(x(t))}{\partial x_1} & \dots & \dots & \frac{\partial A_{n*}(x(t))}{\partial x_n} \end{bmatrix} \otimes x(t) =$$

$$= A(x(t)) + [\tilde{A}(x(t))] \otimes x(t),$$

где $A_{i*}(x(t))$, $i = \overline{1, n}$ – i -строка матрицы $A(x(t))$ и $\otimes$ – символ кронекеровского произведения,

$$\left[\frac{\partial \Pi(x(t))}{\partial x} \right]^T \lambda(t) = \begin{bmatrix} \frac{\partial p_{1*}(x(t))}{\partial x_1} & \dots & \dots & \frac{\partial p_{1*}(x(t))}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial p_{n*}(x(t))}{\partial x_1} & \dots & \dots & \frac{\partial p_{n*}(x(t))}{\partial x_n} \end{bmatrix} \lambda(t) =$$

$$= [\tilde{\Pi}(x(t))] \lambda(t),$$

где $p_{i*}(x(t))$, $i = \overline{1, n}$ – i -строка матрицы $\Pi(x(t))$ и $\otimes$ – символ кронекеровского произведения.

Перепишем уравнение (2.8) с учетом вышеприведенных обозначений:

$$\frac{d}{dt} \lambda(t) = -A^T(x(t))\lambda(t) - C^T Q C x(t) - \{[\tilde{A}(x(t)) \otimes x(t)] - [\tilde{\Pi}(x(t))] \lambda(t)\}. \quad (2.8)$$

Краевое условие для уравнения (2.8) определяется соотношением:

$$\lambda(t_f) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial (y^T(T) F y(T))}{\partial x} \right\}^T = C^T F C x(T). \quad (2.10)$$

Будем искать $\lambda(t)$ в виде:

$$\lambda(t) = S(x(t))x(t). \quad (2.11)$$

Установим свойства матрицы $S(x(t))$. Для этого продифференцируем выражение (2.11):

$$\frac{d}{dt} \lambda(t) = \left\{ \frac{d}{dt} S(x(t)) \right\} x(t) + S(x(t)) \frac{d}{dt} x(t). \quad (2.12)$$

Подставляя в (2.12) выражение для $dx(t)/dt$ (2.6), получим:

$$\frac{d}{dt} \lambda(t) = \left[\frac{d}{dt} S(x(t)) + S(x(t))A(x(t)) - S(x(t))\Pi(x(t))S(x(t)) \right] x(t). \quad (2.13)$$

Сравнивая (2.9) и (2.13), будем иметь:

$$\frac{d}{dt} S(x(t))x(t) + \tilde{A}(x(t)) \otimes x(t) - \tilde{\Pi}(x(t))S(x(t))x(t) + \{S(x(t))A(x(t)) + A^T(x(t))S(x(t)) - S(x(t))\Pi(x(t))S(x(t)) + C^T Q C\}x(t) = 0.$$

Если предположить, что $S(x(t))$ матрица отыскивается решением матричного уравнения Рикка-

ти с параметрами, зависящими от состояния (*StateDependentRiccatiEquation*, SDRE)

$$S(x(t))A(x(t)) + A^T(x(t))S(x(t)) - S(x(t))\Pi(x(t))S(x(t)) + C^T Q C = 0, \quad (2.14)$$

то следующее уравнение должно отвечать условию оптимальности:

$$\frac{d}{dt} S(x(t))x(t) + \tilde{A}(x(t)) \otimes x(t) - \tilde{\Pi}(x(t))S(x(t))x(t) = 0. \quad (2.15)$$

Краевое условие для дифференциального уравнения (2.15) получаем путем сравнения выражений (2.10) и (2.11) в момент $t = t_f$:

$$S(x(T)) = C^T F C. \quad (2.16)$$

Следуя [12] назовем условие (2.15)-(2.16) критерием оптимальности. Запишем субоптимальные управления для системы (1.1):

$$w(t) = P^{-1} g_1^T(x(t))S(x(t))x(t), u(t) = -R^{-1} g_2^T(x(t))S(x(t))x(t). \quad (2.17)$$

Здесь матрица $S(x(t))$ является решением алгебраического уравнения Риккати (2.14) с параметрами, зависящими от состояния.

Запишем систему (2.6) с управлениями (2.17):

$$\frac{d}{dt} x(t) = A(x(t))x(t) - \Pi(x(t))S(x(t))x(t), x(t_0) = x_0,$$

$$y(t) = Cx(t). \quad (2.18)$$

Утверждение 2.2. Матрица $[\tilde{A}(x(t)) \otimes I_n - \tilde{\Pi}(x(t))S(x(t))]$ неотрицательно определенная. (здесь I_n – единичная матрица).

Доказательство. Введем функцию Ляпунова $V_L(x(t))$ в виде

$$V_L(x(t)) = x^T(t)S(x(t))x(t), dV_L(x(t))/dt \leq -\omega_3\{|x|\}, \forall x,$$

где $\omega_3\{|x|\} > 0, \omega_3(0) = 0$ – скалярная неубывающая функция.

Как следует из второй теоремы Ляпунова, что если выполняется следующее условие

$$\frac{dV_L(x)}{dt} = \frac{\partial V_L(x)}{\partial x} \frac{dx(t)}{dt} \leq -\omega_3\{|x|\}, \quad (2.19)$$

то система устойчива. Принимая во внимание (2.17), перепишем условие (2.18):

$$x^T(t) \left\{ \frac{d}{dt} S(x(t)) + S(x(t))A(x(t)) + A^T(x(t))S(x(t)) - S(x(t))\Pi(x(t))S(x(t)) \right\} x(t) - x^T(t)S(x(t))\Pi(x(t))S(x(t))x(t) \leq -\omega_3\{|x|\}. \quad (2.20)$$

Назначим $\omega_3\{|x|\}$ в виде $\omega_3\{|x|\} = x^T(t)[C^T Q C + S(x)\Pi(x)S(x)]x(t)$. После

ряда трансформаций неравенство (2.19), с учетом (2.14), будем иметь вид:

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} V_L(x(t)) = \\ & = -x^T(t) [\tilde{A}(x(t)) \otimes I_n - \tilde{P}(x(t)) S(x(t))] x(t). \end{aligned} \quad (2.21)$$

Таким образом, условие устойчивости выполняется, если матрица $[\tilde{A}(x(t)) \otimes I_n - \tilde{P}(x(t)) S(x(t))]$ является неотрицательной. ■

Теорема 2.1. Пусть нелинейная система (1.1) представима динамической моделью (1.5) с линейной структурой и параметрами, зависящими от состояния, и задан функционал (1.3). Пусть также положительно определенная матрица $S(x(t))$ есть решение уравнения (2.14). Тогда субоптимальные управления вида (2.17) существуют, и минимальная стоимость в заданный момент окончания управляемого процесса определяется выражением

$$\begin{aligned} J(x, u, w)_{t_f} &= J^*(x(t_f), t_f) = \\ &= \frac{1}{2} x^T(t_0) S(x(t_0)) x(t_0) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} \{x^T(t) [\tilde{A}(x(t)) \otimes I_n - \tilde{P}(x(t)) S(x(t))] x(t)\} dt. \end{aligned} \quad (2.22)$$

Доказательство. Для отыскания значения функционала качества при оптимальных управлениях (2.17) подставим в подинтегральную часть функционала (1.3) выражение $d\{x^T(t) S(x(t)) x(t)\}/dt$, компенсировав вне интегральной части функционала следующими значениями:

$$x^T(t_0) S(x(t_0)) x(t_0) - x^T(t_f) S(x(t_f)) x(t_f).$$

Учитывая, что $S(x(t_f)) = C^T F C$, подинтегральное выражение функционала после небольших вычислений принимает вид:

$$L(x(t)) = x^T(t) [\tilde{A}(x(t)) \otimes I_n - \tilde{P}(x(t)) S(x(t))] x(t).$$

Таким образом, справедливость теоремы 2.1 установлена. ■

Отметим [10, 11], что в случае линейной системы управления параметрами $A = A(t)$, $g_i = g_i(t)$, $i = 1, 2$, матрица $[\tilde{A}(x(t)) \otimes I_n - \tilde{P}(x(t)) S(x(t))]$ равна нулю, так как матрицы $\tilde{A}$, $\tilde{P}$, S в явном виде не зависят от $x(t)$, и значение функционала с соответствующими оптимальными управлениями определяется значением $J(x, u, w)_{t_f} = \frac{1}{2} x^T(t_0) S(t_0) x(t_0)$.

2.2. Задача с открытым горизонтом управления

Рассмотрим задачу слежения для нелинейных инвариантных во времени систем. В этом случае время окончания переходного процесса неограниченно возрастает, матрицы Q , R , P постоянны и положительно определены. Все результаты будут приближенными и справедливыми лишь для очень больших значений времени окончания переходного процесса t_f .

SDC-модель исходной системы (1.1) имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} x(t) &= A(x(t)) x(t) + g_1(x) w(t) + g_2(x) u(t), x(t_0) = x_0, \\ y(t) &= C x(t). \end{aligned} \quad (2.23)$$

Запишем функционал качества:

$$\begin{aligned} J(x, u, w) &= \lim_{t_f \rightarrow \infty} \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} \{y^T(t) Q y(t) + u^T(t) R u(t) - \\ & w^T(t) P w(t)\} dt. \end{aligned} \quad (2.24)$$

Оптимальные управления в рассматриваемом случае имеет вид:

$$\begin{aligned} w(t) &= P^{-1} g_1^T(x) \hat{S}(x(t)) x(t), u(t) = \\ &= -R^{-1} g_2^T(x) \hat{S}(x(t)) x(t), \end{aligned} \quad (2.25)$$

где матрица $\hat{S}(x(t))$ является решением алгебраического матричного уравнения:

$$\begin{aligned} & \hat{S}(x(t)) A(x(t)) + A^T(x(t)) \hat{S}(x(t)) - \\ & - \hat{S}(x(t)) P(x(t)) \hat{S}(x(t)) + \\ & C^T Q C = 0. \end{aligned} \quad (2.26)$$

Запишем уравнение системы (1.1) с управлениями (2.25):

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} x(t) &= f(x(t)) - P(x(t)) \hat{S}(x(t)) x(t), x(t_0) = x_0, \\ y(t) &= C x(t). \end{aligned} \quad (2.27)$$

Отметим, что, как было показано в Разделе 2.1, управления (2.25), синтезированные с использованием SDRE-метода, реализуют локально асимптотическое устойчивое решение задачи дифференциальной игры в замкнутой форме для системы, представленной моделью (2.23). Однако асимптотическая стабилизация может не иметь место в исходной нелинейной системе (2.27) с синтезированными SDRE-методом управления и произвольным начальным состоянием x_0 (глобальная асимптотическая стабилизация).

3. Метод построения регулятора с квазипостоянными параметрами

Основная проблема реализации управлений вида (2.25) заключается в сложности нахождения матрицы $S(x(t))$, как решения уравнения (2.26) в темпе функционирования объекта. Для получения реализуемого решения задачи управления нелинейным объектом вида (1.1) будет применен метод замороженных коэффициентов [12]. Интервал управления $T = t_f - t_0$ разобьем на N отдельных подынтервалов $[t_0, t_1], [t_1, t_2], \dots, [t_{N-1}, t_f]$.

Значения матриц $A(x_0), A(x_1), A(x_2), \dots, A(x_{N-1}), g_1(x_0), g_1(x_1), g_1(x_2), \dots, g_1(x_{N-1})$, $P(x_0), P(x_1), P(x_2), \dots, P(x_{N-1})$ определенных в точках $t_0, t_1, t_2, \dots, t_{N-1}$,

используются при вычислении положительно определенной матрицы с постоянными параметрами $S_i, i = 0, 1, 2, \dots, t_{N-1}$:

$$A^T(x_i)S_i + S_i A(x_i) - S_i g(x_i)R^{-1}g^T(x_i)S_i + Q = 0, i = 0, 1, 2, \dots, t_{N-1}. \quad (3.1)$$

Таким образом, управления в каждом подынтервале будут иметь вид:

$$\begin{aligned} w_i(t) &= P^{-1}g_{12}^T(\tilde{x})S_i\tilde{x}(t), u_i(t) = \\ &= -R^{-1}g_2^T(\tilde{x})S_i\tilde{x}(t), i = \\ &0, 1, 2, \dots, t_{N-1}. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Система с (1.1) с управлениями (3.2) в каждом из подынтервалов $[t_i, t_{i+1}]$, $i = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ описывается уравнением:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}\tilde{x}(t) &= f(\tilde{x}(t)) - \Pi(\tilde{x}(t))S_i\tilde{x}(t), \tilde{x}(t_i) = \\ &= \tilde{x}_i, t \in [t_i, t_{i+1}]. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Отметим, что количество подынтервалов N , которое определяет длительность по времени интервала $[t_i, t_{i+1}]$, зависит как от самого существа задачи управления, так и от возможности устройства по реализации вычислений матрицы S_i по формуле (3.1).

Утверждение 3.1. При увеличении количества подынтервалов разбиения, т.е. при уменьшении самих подынтервалов $\tau = t_{i+1} - t_i$, следует следующее: $\lim_{\tau \rightarrow 0} S(x(t_i)) \rightarrow S(x(t_{i+1}))$, $i = 0, 1, N - 1$ и

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} [x(t) - \tilde{x}(t)] \rightarrow 0. \quad (3.4)$$

Доказательство. Запишем рассогласование $\varepsilon(t_{i+1}) = x(t_{i+1}) - \tilde{x}(t_{i+1})$, $i = 0, 1, N - 1$ решений уравнений

$$\frac{d}{dt}x(t) = [A(x(t)) - \Pi(x(t))S(x(t))x(t)]x(t), x(t_0) = x_0,$$

$$\frac{d}{dt}\tilde{x}(t) = [A(\tilde{x}(t)) - \Pi(\tilde{x}(t))S_i]\tilde{x}(t), \tilde{x}(t_0) = x_0.$$

в интервале управления $t \in [t_i, t_{i+1}]$.

Пусть

$$A(x(t)) = A + a(x(t)), A(\tilde{x}(t)) = A + a(\tilde{x}(t)), \Pi(x(t)) = \Pi + n(x(t)),$$

$$S(x(t)) = S + s(x(t)), S_i = S + s_i, A = A(x(t_0)),$$

$$\Pi = \Pi(x(t_0)),$$

где матрицы A и Π с постоянными элементами образуют управляемую пару, а положительно определенная матрица S есть решение алгебраического матричного уравнения Риккати:

$$SA + A^T S - SgR^{-1}g^T S + Q = 0.$$

Определим ошибку рассогласования траекторий $x(t)$ и $\tilde{x}(t)$:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}\varepsilon(t) &= [A - \Pi S]\varepsilon(t) + a(x(t))x(t) - \\ &- a(\tilde{x}(t))\tilde{x}(t) - \Pi[s(x(t)) - s_i]x(t) - \\ &- [\Pi(x(t))n^T(x(t)) + n(x(t))\Pi^T(x(t)) + n(x(t))n^T(x(t))] \\ &[S + s(x)]x(t) + \\ &+ [\Pi(\tilde{x}(t))n^T(\tilde{x}(t)) + n(\tilde{x}(t))\Pi^T(\tilde{x}(t)) + n(\tilde{x}(t))n^T(\tilde{x}(t))] \\ &[S + s_i]\tilde{x}(t), \varepsilon(t_0) = x(t_0) - \tilde{x}(t_0) = 0 \end{aligned}$$

или, отмечая что $\Pi(\cdot)$ и $n(\cdot)$ симметрические матрицы,

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}\varepsilon(t) &= [A - \Pi S]\varepsilon(t) + \varphi(x(t), \tilde{x}(t)) \\ \varepsilon(t_0) &= 0, \end{aligned} \quad (3.5)$$

где

$$\begin{aligned} \varphi(x(t), \tilde{x}(t)) &= a(x(t))x(t) - a(\tilde{x}(t))\tilde{x}(t) - \\ &- [\Pi(x(t))R^{-1}n(x(t)) + n(x(t))\Pi(x(t)) + n(x(t))n(x)] \\ &[S + s(x(t))]x(t) + \\ &+ [\Pi(\tilde{x}(t))n(\tilde{x}) + n(\tilde{x})\Pi(\tilde{x}(t)) + n(\tilde{x}(t))n(\tilde{x}(t))] \\ &[S + s_i]\tilde{x}(t). \end{aligned}$$

Запишем решение уравнения (3.5) в интервале $[t_i, t_{i+1}]$ с учетом того, что матрица $[A - \Pi S]$ — действительная с постоянными элементами:

$$\begin{aligned} \varepsilon(t_{i+1}) &= \\ &= \varepsilon(t_i) + \int_{t_i}^{t_{i+1}} \{\exp[A - \Pi S](t_{i+1} - \gamma)\} \varphi(x(\gamma), \tilde{x}(\gamma)) d\gamma. \end{aligned}$$

Накопленное значение ошибки рассогласования в момент $t_N = t_f$ определяется формулой

$$\varepsilon(t_N) = \sum_{i=0}^{N-1} \left\{ \int_{t_i}^{t_{i+1}} \{\exp[A - \Pi S](t_{i+1} - \gamma)\} \varphi(x(\gamma), \tilde{x}(\gamma)) d\gamma \right\} \quad (3.6)$$

так как $\varepsilon(t_0) = 0$.

Перепишем равенство (3.6) в виде

$$\|\varepsilon(t_N)\| = \left\| \sum_{i=0}^{N-1} \left\{ \int_{t_i}^{t_{i+1}} \{\exp[A - \Pi S](t_{i+1} - \gamma)\} \varphi(x(\gamma), \tilde{x}(\gamma)) d\gamma \right\} \right\|,$$

откуда

$$\|\varepsilon(t_N)\| \leq \sum_{i=0}^{N-1} \left\{ \int_{t_i}^{t_{i+1}} \|\{\exp[A - \Pi S](t_{i+1} - \gamma)\} \varphi(x(\gamma), \tilde{x}(\gamma))\| d\gamma \right\}. \quad (3.7)$$

Учитывая, что действительные корни характеристической матрицы $[A - \Pi S]$ являются отрицательными, можно назначить такие положительные постоянные (Т.Н. Gronwall) G и β что

$$\|\exp[A - \Pi S](t_{i+1} - \gamma)\| \leq G e^{-\beta(t_{i+1} - \gamma)}. \quad (3.8)$$

Очевидно, что значение $\|\varphi(x(\gamma), \tilde{x}(\gamma))\|_{\gamma=t_{i+1}}$ зависит как от величины подынтервала $\tau = T/N$, так и от значений матрицы $S_i = S + s_i$ в каждом

из подинтервалов. Учитывая (3.4), отметим, что $\lim_{\tau \rightarrow 0} \|\varphi(x(\gamma), \tilde{x}(\gamma))\| \rightarrow 0$. Следовательно, можно найти такое число $K_{i+1} > 0$, что

$$\|\varphi(x(\gamma), \tilde{x}(\gamma))\|_{\gamma=t_{i+1}} \leq K_{i+1}\tau = K_{i+1}(T/N),$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (3.9)$$

Таким образом, выражение (3.7) с учетом (3.8) и (3.9), имеет вид:

$$\|\varepsilon(t_N)\| \leq G \int_{t_i}^{t_{i+1}} e^{-\beta(t_{i+1}-\gamma)} \sum_{i=0}^{N-1} \|\varphi(x(\gamma), \tilde{x}(\gamma))\| d\gamma \leq G\tau \sum_{i=0}^{N-1} \int_{t_i}^{t_{i+1}} e^{-\beta(t_{i+1}-\gamma)} K_{i+1} d\gamma$$

Пусть $K^* = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} K_{i+1}$, тогда

$$\|\varepsilon(t_N)\| \leq GK^*\tau \sum_{i=0}^{N-1} \int_{t_i}^{t_{i+1}} e^{-\beta(t_{i+1}-\gamma)} d\gamma$$

или, учитывая, что в рассматриваемом случае $t_0 = 0$,

$$\|\varepsilon(t_f)\| \leq GK^*\tau \int_0^{t_f} e^{-\beta(t_f-\gamma)} d\gamma. \quad (3.10)$$

Таким образом, норма рассогласования $\|\varepsilon(t_f)\|$ траекторий $x(t)$ и $\tilde{x}(t)$ в заданном интервале времени управления $T = t_f - t_0$ с N подинтервалами поиска матрицы $S_i, i = 0, 1, 2, \dots, N-1$ отвечает условию:

$$\|\varepsilon(t_f)\| \leq \frac{K^*TG}{N} [1 - e^{-\beta t_f}].$$

Как видно, $\|\varepsilon(t_f)\|$ в конце интервала управления зависит от количества подинтервалов N или, что то же самое, от длины подинтервала τ .

Таким образом, справедливость Утверждения 1 установлена. ■

Отметим, что значение функционала качества (3.24) при управлении нелинейным объектом (1.1) с использованием его математической модели (2.23) и управлениями (3.2), имеющим квазипостоянные параметры, вычисляется по формуле [10]:

$$J(\tilde{x}(\cdot))_N = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{N-1} x^T(t_i) S_i x(t_i), i = 0, 1, \dots, N-1.$$

4. Пример

Не вдаваясь в физический смысл, рассмотрим пример из [13], существенно усложнив его за счет постановки задачи вывода и сопровождения по заданной траектории при условии действия возмущений. Исследуемый нелинейный объект описывается дифференциальным уравнением:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{a_1(t)}{3} x_2(t) x_3(t) \\ -a_2(t) x_1(t) x_3(t) \\ a_3(t) x_1(t) x_2(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1(t) u_1(t) \\ b_2(t) u_2(t) \\ b_3(t) u_3(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} d_1(t) \\ d_2(t) \\ d_3(t) \end{pmatrix} w(t),$$

$$y(t) = Cx(t) = x_1(t), x_1(0) = 40,$$

$$x_2(0) = 10, x_3(0) = 20. \quad (4.1)$$

Параметры объекта имеют следующие номинальные значения: $a_1, a_2 a_3 = 1, b_1 = 10, b_2 = 5, b_3 = 10$.

Уровень возмущений $w(t)$ по отношению к начальным условиям составляет порядка 20% по каждой координате. Таким образом, при единичной дисперсии случайного процесса $w(t)$ параметры матрицы D имеют следующие значения: $d_1 = 8, d_2 = 2, d_3 = 4$.

Модель объекта (4.1) с параметрами, зависящими от состояния, имеет вид:

$$\frac{d}{dt} x(t) = A(x(t))x(t) + g_1 w(t) + g_2 u(t), x(t_0) = x_0. \quad (4.2)$$

Здесь

$$A(x) = \begin{pmatrix} 0 & x_3(t)/3 & 0 \\ 0 & 0 & -x_1(t) \\ x_2(t) & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$B = \begin{pmatrix} 10 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{pmatrix}, D = \begin{pmatrix} 8 \\ 2 \\ 4 \end{pmatrix}. \quad (4.3)$$

Введем функционал качества

$$J(x, u, w) = \frac{1}{2} \int_0^5 \{x^T(t) Q x(t) + u^T(t) R u(t) - w^T(t) P w(t)\} dt, \quad (4.4)$$

где положительно определенный параметр Q содержит информацию о начальном условии системы (4.1).

Учитывая тот факт, что матрица $\Pi = g_2 R^{-1} g_2^T - g_1 P^{-1} g_1^T$ должна быть, по крайней мере, положительно полуопределенной, и принимая во внимание значения дисперсии возмущения и параметров матриц g_1 и g_2 , назовем в (4.4) $P = I_3$ и $R = I_3$ (здесь I_3 единичная матрица). Таким образом, матрица Π имеет вид:

$$\Pi = K^T K = \begin{pmatrix} 36 & -16 & -32 \\ -16 & 21 & -8 \\ -32 & -8 & 84 \end{pmatrix}.$$

Для получения реализуемого решения задачи управления нелинейным объектом вида (4.1) интервал управления $T = t_f - t_0 = 5$ разобьем на 5 отдельных подинтервалов $[t_0, t_1], \dots, [t_4, t_5]$, т.е. $\tau = 1$.

Таким образом, следует находить значение матрицы S_i в 5 точках переходного процесса:

$$x(0), x(1), x(2), x(3), x(4).$$

$$A^T(x_i) S_i + S_i A(x_i) - S_i \Pi S_i + Q = 0,$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, t_{N-1}. \quad (4.5)$$

Переходные процессы определяются решением уравнения

$$\frac{d}{dt} \tilde{x}(t) = [A(\tilde{x}(t)) - \Pi S_i] \tilde{x}(t), x(t_0) = x_0.$$

На рис. 1 и 2 представлены графики управлений $u^T(t) = (u_1(t)u_2(t)u_3(t))$ и $w(t)$ соответственно. Изменение параметров регуляторов происходит в моменты $t_1 = 1$ и $t_2 = 2$.

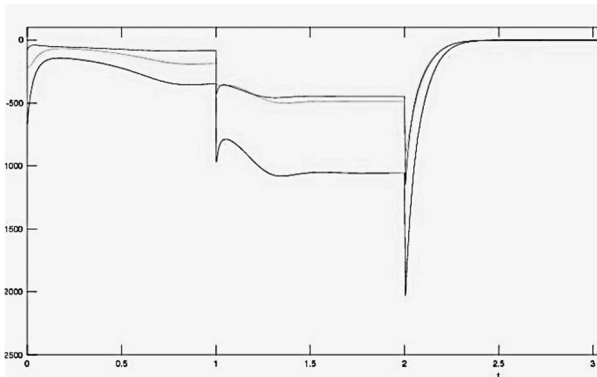


Рис. 1. Управление $u^T(t) = (u_1(t)u_2(t)u_3(t))$

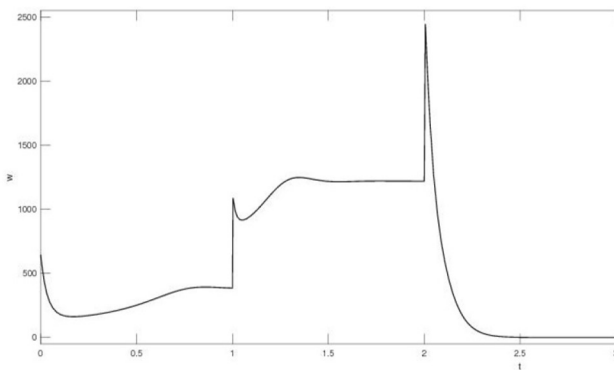


Рис. 2. Управление $w(t)$

На рис. 3–5 представлены графики переходных процессов $\tilde{x}_1(t)$, $\tilde{x}_2(t)$ и $\tilde{x}_3(t)$.

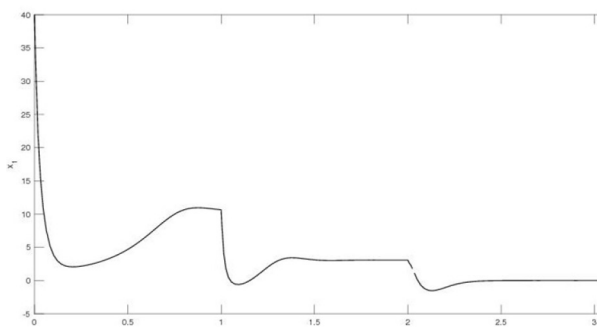


Рис. 3. Переходный процесс $\tilde{x}_1(t)$

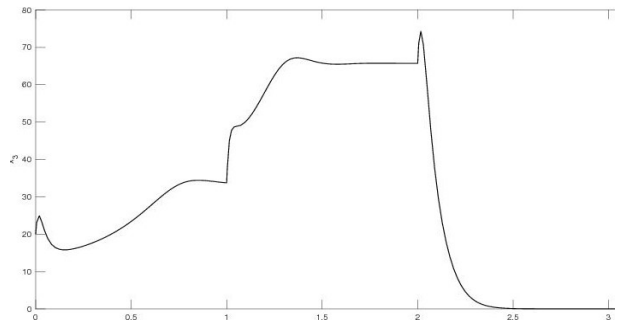


Рис. 4. Переходный процесс $\tilde{x}_2(t)$

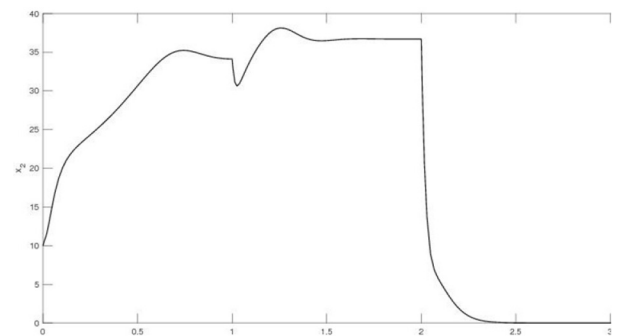


Рис. 5. Переходный процесс $\tilde{x}_3(t)$

Как следует из представленных графиков система (4.1) стабилизируется управлением $u(t)$ при противодействии $w(t)$.

Заключение

В отличие от известных работ в настоящей статье рассматривается задача синтеза оптимальных управлений для нелинейного объекта в постановке дифференциальной игры с нулевой суммой. Линейность структуры преобразованной нелинейной системы и квадратичный функционал качества позволяют при синтезе оптимальных управлений, т.е. параметров регуляторов, перейти от необходимости поиска решений уравнения Беллмана-Айзекса к уравнению типа Риккати с параметрами, зависящими от состояния. Синтезированные управления обеспечивают SDC-модели свойство асимптотической устойчивости и позволяют определить соотношение наложенных на управления ограничений, при котором обеспечивается условие существования дифференциальной игры с нулевой суммой. Основная проблема реализации оптимального управления связана с проблемой поиска решения уравнения Риккати с параметрами, зависящими от состояния, в темпе функционирования объекта. Для решения этого уравнения в работе предложен метод субоптимальных управлений с квазистационарными значениями параметров (ме-

тод замороженных коэффициентов). Дана оценка расхождения оптимального и субоптимального решений. В качестве иллюстрации полученных результатов приведено моделирование поведения нелинейной системы с двумя игроками с открытым горизонтом управления.

Литература

1. Айзекс Р. Дифференциальные игры. М.: Мир. 1967. 480 с. [Isaacs, R. Differential Games. – N.-Y.: John Wiley and Sons, 1965.]
2. Понтрягин Л.С. О линейных дифференциальных играх. 1 // Доклады Академии наук СССР. 1967. Т. 174. № 6. С. 1278–1280.
3. Понтрягин Л.С. О линейных дифференциальных играх. 2 // Доклады Академии наук СССР. 1967. Т. 175. № 4. С. 764–766.
4. Мищенко Е.Ф. О некоторых игровых задачах преследования и уклонения от встречи // Автоматика и телемеханика. 1972. № 9. С. 24–30.
5. Пшеничный Б.Н. Необходимые условия экстремума. М.: Наука, 1969. 150 с.
6. Красовский Н.Н., Субботин А.И. Позиционные дифференциальные игры. М.: Наука, 1974. 455 с.
7. А. Брайсон, Хо Ю-Ши Прикладная теория оптимального управления. М.: Изд. Мир, 1972. 544 с.
8. Беллман Р., Энджел Э. Динамическое программирование и уравнения в частных производных. М.: Изд-во Мир, 1974. 207 с.
9. Афанасьев В.Н. Математическая теория управления нелинейными непрерывными динамическими системами. М.: КРАСНАНД. 2020. 480 с.
10. Атанс М., Фалб П.Л. Оптимальное управление. М.: Машиностроение. 1968. 764 с.
11. J.R. Cloutier, C.N. D'Souza and C.P. Mracek. Nonlinear regulation and nonlinear H_{∞} control via the state-dependent Riccati equation technique. Part 1 theory. In Proceedings of the First International Conference on Nonlinear Problems in Aviation and Aerospace, Daytona Beach, Florida. 1996
12. Doyle J., Huang Y., Prims J., Freeman R., Murray R. and Krstic M. Nonlinear Control: Comparisons and case studies. In Notes from the Nonlinear Control Workshop conducted at the American Control Conference, Albuquerque, New Mexico. 1998.
13. Федоренко Р.П. Приближенное решение задач оптимального управления. М.: Наука. 1978. 487 с.

Ладжал Брахим. Московский Институт электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая Школа Экономики». г. Москва, Россия. Аспирант. Область научных интересов: методы и алгоритмы системного анализа, управления, обработки информации в технических системах. E-mail: thehay89@gmail.com

Synthesis Control of a Nonlinear Dynamic Object with Limited Perturbations and Using the SDC-Method

Ladjal Brahim

Moscow Institute of Electricians and Mathematics National Research University

Higher School of Economics, Moscow, Russia

Abstract. The optimal control problem in the differential game problem with restrictions on the control. The problem of optimal control under the action of bounded perturbations is formulated for a class of dynamical systems whose nonlinear objects are representable as objects with a linear structure and state-dependent parameters. The introduced quadratic functional allows us to consider the problem with the use of methods of differential games with zero sum. The linearity of the structure of the transformed nonlinear system and the quadratic quality functional allow for the synthesis of optimal controls, i.e. parameters of regulators, go from the need to search for solutions to the Bellman-Isaacs equation to an equation of the Riccati type with state-dependent parameters. The synthesized controls provide the SDC-model with the property of asymptotic stability and make it possible to determine the ratio of the constraints imposed on the controls, under which the condition for the existence of a differential game with zero sum is ensured. The main problem of implementing optimal control is related to the problem of finding a solution to the Riccati equation with state-dependent parameters at the rate of operation of the object. To solve this equation, a suboptimal control method with quasi-stationary values of the parameters is proposed. An estimate of the discrepancy between optimal and suboptimal solutions is given. Example will be provided to illustrate the effectiveness and of FRE technique for design of nonlinear systems based feedback controllers.

Keywords: *extended linearization method, Bellman-Isaacs equation, Riccati equation with state-dependent parameters.*

DOI: 10.14357/20790279230209

References

1. Isaacs R. Differential Games. – M.: Mir, 1967. – 480 p. [Isaacs, R. Differential Games. – N.Y.: John Wiley and Sons, 1965.]
2. Pontryagin L.S. On linear differential games. 1 // Reports of the Academy of Sciences of the USSR. – 1967. – Vol. 174. – No. 6. – pp. 1278-1280.
3. Pontryagin L.S. On linear differential games. 2 // Reports of the USSR Academy of Sciences. - 1967. – Vol. 175. – No. 4. – pp. 764-766.
4. Mishchenko E.F. About some game tasks of pursuit and evasion from a meeting // Automation and telemekhanics. – 1972. – No. 9. – pp. 24-30.
5. Pshenichny B.N. Necessary conditions of extremum. – M.: Nauka, 1969. – 150 p.
6. Krasovsky N.N., Subbotin A.I. Positional differential games. M.: Nauka, 1974. – 455 p.
7. A. Bryson, Ho Yu-Shi. Applied Theory of optimal Control. Moscow: Mir Publishing House, 1972. 544 p.
8. Bellman R., Angel E. Dynamic programming, and partial differential equations. – Moscow: Mir Publishing House, 1974. – 207 p.
9. Afanasyev V.N. Mathematical theory of control of nonlinear continuous dynamic systems. Moscow: KRASAND. 2020. . – 480 p.
10. Atans M. Falb P.L. Optimal control. M.: Mechanical Engineering. 1968. 764 p.
11. J.R. Cloutier, K.N. D'Souza and K.P. Mrachek. Nonlinear regulation and nonlinear control of Hinf using the state-dependent Riccati equation method. Part 1 theory. In Proceedings of the First International Conference on Nonlinear Problems in Aviation and Aerospace, Daytona Beach, Florida, 1996
12. Doyle J., Kuan Y., Prima J., Freeman R., Murray R. and Krstic M. Nonlinear Control: Comparisons and Case studies. In notes from a seminar on nonlinear control held at the American Control Conference, Albuquerque, New Mexico, 1998
13. Fedorenko R.P. Approximate solution of optimal control problems. M.: Nauka, 1978. 487 p.

Ladjal Brahim. Moscow Institute of Electronics and Mathematics of the National Research University Higher School of Economics. Moscow, Russian. Graduate student. Research interests: Methods and algorithms of system analysis, management, information processing in technical systems . E-mail: thehay89@gmail.com

Системный анализ в медицине и биологии

Проблема экологии питания: системный анализ и IT-решение

Н.С. Потемкина, В.Н. Крутько, А.В. Халявкин, А.М. Маркова

Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», г. Москва, Россия

Аннотация. В работе представлены результаты системного анализа взаимосвязи индивидуального питания, экологии и экономики. Обоснована возможность создания и внедрения в повседневную практику здоровых, сбалансированных, полноценных, профилактических и отвечающих современным экологическим требованиям рационов питания, основанных на выборе типовых для России продуктов питания. Широкое распространение таких рационов с помощью сетевых технологий может способствовать решению проблем устойчивого развития природы и общества.

Ключевые слова: *здоровье; экология; полноценное питание; влияние питания на экологию; компьютерная оптимизация диет.*

DOI: 10.14357/20790279230210

Введение

Глобальные изменения в мире, связанные с экономическим развитием и урбанизацией привели к разрушению традиционной культуры питания. На смену пришло стандартизированное питание с большим количеством продуктов животноводства, обработанных, рафинированных продуктов и уменьшенным объемом натуральных растительных продуктов. Общеизвестно, что именно в результате этих изменений в питании значительно увеличилась заболеваемость диабетом II-го типа, ишемической болезнью сердца, онкологическими и другими хроническими неинфекционными заболеваниями (ХНИЗ), увеличивающими общий риск смерти и снижающими продолжительность жизни [1, 2]. Ряд исследований показал, что производство многих продуктов питания создает огромные экологиче-

ские нагрузки, не являясь необходимым следствием наших потребностей [3–5]. Поэтому представляется интересным и полезным определить, как выбор продуктов питания каждым отдельным человеком может повлиять на здоровье населения в целом и состояние окружающей среды.

Целью данной работы является системный анализ взаимовлияния индивидуального питания, экологии и экономики, а также обоснование возможности создания и внедрения в повседневную практику здоровых, сбалансированных, полноценных и отвечающих современным экологическим требованиям рационов питания, основанных на выборе типовых для России продуктов питания. Широкое распространение таких рационов может способствовать решению проблем устойчивого развития природы и общества.

1. Системный анализ взаимосвязи индивидуального питания, экологии и экономики

Для того, чтобы выявить взаимосвязи выбора продуктов питания населением с проблемами здоровья и экологии был проведен системный анализ научных исследований [1-10, 12-14], направленных на изучение влияния индивидуального питания на здоровье населения и состояние окружающей среды. Результаты этого анализа обобщены нами в виде структурной схемы взаимосвязей индивидуального выбора продуктов питания, здоровья населения, некоторых экологических и экономических проблем (рис. 1).

Как видно из рисунка, выбор продуктов населением оказывает глобальное влияние на здоровье, экологические и экономические проблемы. Реализация массового спроса на продукты питания, через торговлю, влияет на сельское хозяйство и пищевую промышленность. Поэтому выбор населением здоровых продуктов питания может привести к позитивным последствиям не только для здоровья, но и для окружающей среды. Продовольственные системы оказывают значительное давление на экологию планеты, включая изменение климата, деградацию и истощение земель и водных ресурсов,

сокращение биоразнообразия, что, в свою очередь, приводит к нарушению продовольственной безопасности и угрожает здоровью населения [4 – 7].

«Если в мире будут широко использоваться диеты, полезные для здоровья, мы сможем не только предотвратить хронические неинфекционные заболевания, связанные с диетой, но и сократить глобальные выбросы парниковых газов, уменьшить площади сельскохозяйственных земель, сократить вымирание многих видов растений и животных и предотвратить катастрофическое снижение биоразнообразия. Коллективный вклад многих людей, ведущих здоровый образ жизни, включая использование диет, в которых животные продукты частично или полностью заменены растительными, положительно скажется не только на их индивидуальном здоровье, но может предотвратить глобальную экологическую катастрофу» [1].

Однако здоровому выбору продуктов питания препятствует ряд причин, зависящих от государственной политики в сферах производства и потребления продуктов питания, экологии и здоровья населения. Главная среди них – обилие дискреционных продуктов в магазинах, т.е. таких, которые не содержат в себе необходимых для организма веществ, но при этом содержат много соли, саха-

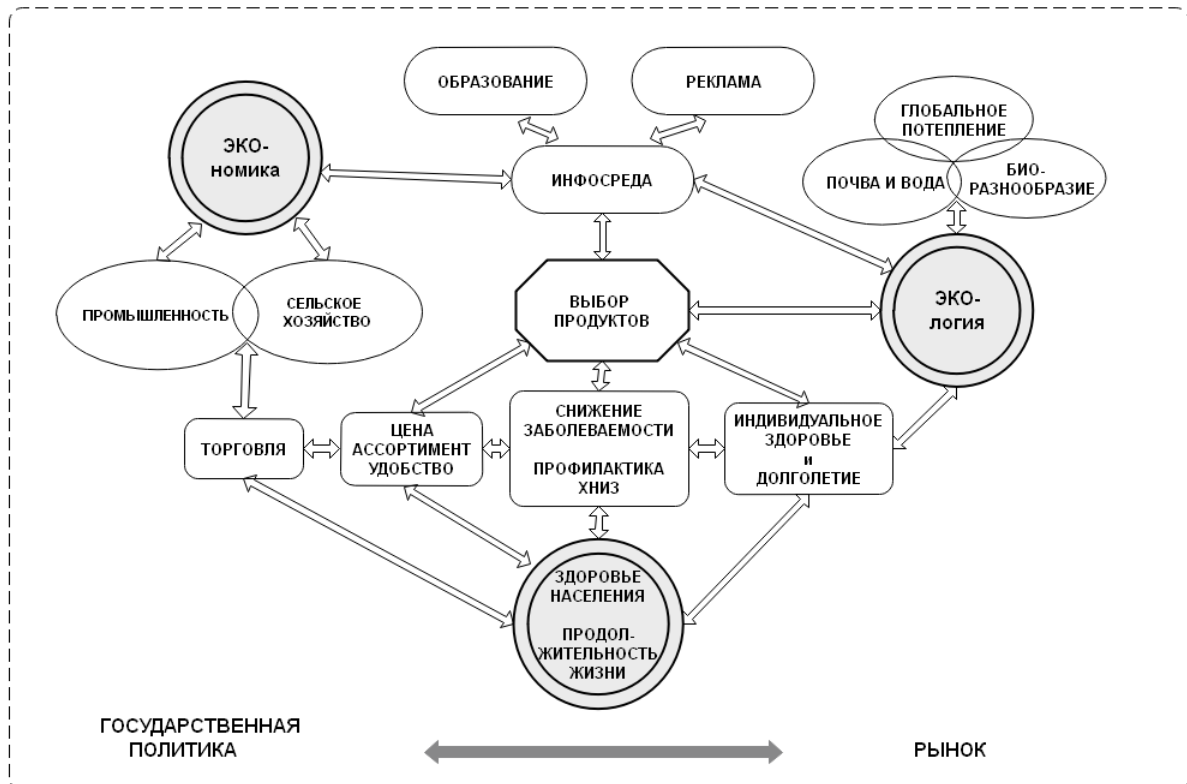


Рис. 1. Структурная схема взаимосвязей индивидуального выбора продуктов питания с экологией, экономикой и здоровьем

ра, жиров и мало витаминов. Содержат усилители вкуса и консерванты, а также обладают высокой калорийностью и вызывают привыкание. Эти продукты дешевле полезных, удобно упакованы, часто не требуют приготовления, поэтому просты в употреблении, а для большинства потребителей вкус, стоимость и удобство считаются более важными, чем качество, полезность и натуральность [10]. Здоровому выбору препятствует недобросовестная реклама и недостаточный уровень образования населения.

В ряде недавних исследований показано, что хорошо сбалансированные рационы с минимальным содержанием мясных и молочных продуктов, а также сбалансированные вегетарианские рационы объединяют преимущества для здоровья, окружающей среды и экономики [1 - 11]. Считается, что наиболее здоровыми, обеспечивающими профилактику большинства хронических неинфекционных заболеваний (ХНИЗ) и экологически щадящими, являются средиземноморская и EAT-Lancet диета [15], а также вегетарианство [7]. Переход на растительные рационы может сократить землепользование (связанное с питанием) на 76%, выбросы парниковых газов – на 49%, эвтрофикацию – на 49% и использование воды – на 14-21% [16]. Также известно, что сокращение производства дискреционных продуктов, оказывающих негативное воздействие на здоровье и окружающую среду, вызывающих метаболический синдром и сопутствующие заболевания [9], может снизить количество парниковых газов на 43% и предотвратить возникновение многих заболеваний. Таким образом, небольшие комплексные изменения в диете могут иметь большое значение одновременно для окружающей среды и здоровья человека [1,2,9,10]. Примечательным является тот факт, что технологии, наносящие меньший ущерб окружающей среде, оказываются и более полезными для здоровья человека [1, 9, 11]. Системное решение этой проблемы, как следует из рис. 1, заключается в подходе, объединяющем развитие органического сельского хозяйства, уменьшение и грамотную утилизацию пищевых отходов, снижение производства и потребления животного белка и дискреционных продуктов и увеличение производства и потребления бобовых, овощей и фруктов. Увеличение производства и потребления бобовых послужит полезным дополнением к животным белкам и, одновременно, источником органических азотных удобрений. Такой подход будет содействовать охране здоровья населения, защите среды обитания и достижению целей устойчивого развития [1,10–14].

Однако возникают некоторые опасения, связанные с возможной неполноценностью рационов с пониженным содержанием, либо с полным отсутствием животных продуктов. Задача нахождения рационального баланса между требованиями формирования здоровых рационов, их экологической безопасностью и гигиеническими нормативами достаточно сложна и может быть эффективно решена с помощью методов компьютерной оптимизации индивидуального питания. Ранее эти методы были использованы авторами для оптимизации состава Продовольственной корзины РФ [11].

2. Разработка рациона питания, отвечающего гигиеническим и экологическим требованиям

За основу типового для РФ здорового питания выбран рацион, утвержденный Приказом Министерства здравоохранения РФ от 19 августа 2016 г. № 614 «Об утверждении Рекомендаций по рациональным нормам потребления пищевых продуктов, отвечающих современным требованиям здорового питания» [17]. На основе списка продуктов, приведенного в приказе, нами был сформирован предварительный продуктовый набор, предназначенный для употребления одним человеком в течение одного дня (рацион BASE). В набор вошли продукты из следующих групп: зерновые и бобовые, включая крупы, муку и хлеб в пересчете на муку; картофель, овощи и бахчевые; фрукты; сахар и кондитерские изделия; белковые продукты, включая мясо, птицу, рыбу; молочные продукты, включая молоко, кефир, масло сливочное, сыр и сметану; яйца куриные; масло растительное. Количество продуктов определялось путем пересчета величин, приведенных в приказе в единицах кг/год, в г/день.

Для облегчения процесса оптимизации и учитывая один из главных принципов здорового питания – разнообразие продуктов в рационе, мы старались сделать этот набор возможно более разнообразным, но учитывающим ориентировочные цены на продукты и выбирая наиболее дешевые. Сформированный таким образом набор продуктов был принят за исходный для выполнения процедуры оптимизации. В процессе оптимизации исходный набор изменялся и дополнялся за счет продуктов, богатых недостающими нутриентами с целью удовлетворения диетических рекомендаций и достижения нормативных требований по большинству нутриентов [17]. При этом мы придерживались основных характеристик средиземноморской диеты, практически признанной наилучшей [15]. К этим характеристикам относятся

высокое потребление оливкового масла, бобовых, орехов, злаков, фруктов и овощей, умеренное потребление рыбы и молочных продуктов, низкое потребление мяса, особенно красного, низкое или нулевое потребление дискреционных продуктов. В то же время мы учитывали реальный ассортимент продуктов в РФ.

Оптимизация выполнена с помощью компьютерной системы «Питание для здоровья и долголетия» [19,20], которая предназначена для оценки фактического питания, оптимизации рациона методом линейного программирования и включает в себя интерактивную процедуру, позволяющую изменять условия решения задачи оптимизации. Критерием оптимизации в нашем случае была минимизация отклонения калорийности рациона от 2800 ккал в день, что соответствует калорийности набора продуктов, сформированного на основе рекомендаций МЗ для трудоспособного активного человека [17]. В качестве ограничений заданы условия, которым должен соответствовать нутриентный состав рациона и масса употребляемых пищевых продуктов. А именно – содержание каждого нутриента в оптимальном рационе должно быть не меньше нормативного значения и не больше максимально допустимого [18]. Одновременно с этим масса каждого продукта в рационе ограничена сверху в соответствии с диетическими рекомендациями [17]. Список основных оптимизируемых нутриентов включает 30 нутриентов и представлен рис. 2 и 3. Стоимость рациона не оптимизировалась, т.к. это привело бы к значительному и неоправданному усложнению задачи, учитывая, что мы ориентировались на недорогие повседневные продукты.

Оценка нутриентного состава выполнялась на основе данных о содержании нутриентов в продуктах питания [21,22] и российских нормативов потребления [18], нормированных на 1000 ккал.

Хотелось бы отметить, что большинство работ по оптимизации питания, посвящены теоретическим вопросам создания «диетических моделей», сочетающих ограничения в отношении питания, стоимости, экологии и приемлемости. Эти модели не предназначены для создания реалистичной диеты, а скорее определяют типы продуктов, необходимые для удовлетворения ограничений рекомендуемого диетического потребления энергии и питательных веществ с наименьшими затратами [23,24]. Как правило, в этих работах показано, что совместить все требования к рациону, включая стоимость, реалистичный ассортимент, диетические ограничения и национальные особенности невозможно. В то время как нашей задачей

является разработка оптимального рациона для практического применения. Возможность создания такого рациона была продемонстрирована в нашей публикации по оптимизации продовольственной корзины РФ [11].

В рамках сформулированной цели исследования и учитывая взаимосвязи между питанием и экологией, мы попытались получить продуктовый набор, который может послужить основой для создания здоровых, профилактических и экологически щадящих рационов, подходящих для питания россиян. По сравнению с Продовольственной корзиной РФ, которая была оценена и оптимизирована в работе [11], рацион, рекомендованный МЗ, является значительно более богатым и разнообразным, что закономерно положительно сказалось на его нутриентном составе (рис. 2, рацион BASE).

Оценка рациона, сформированного на основе рекомендаций МЗ показала, что в рационе BASE достаточное количество белков, витаминов B12, B6, E, C, тиамин. Рацион является полноценным по таким минералам, как железо, калий, марганец, селен и фосфор. Следует отметить, что если превышение норматива по белку на 33% может считаться несколько избыточным (хотя в ряде работ рекомендуется повышенное потребление белка, особенно для пожилых), то превышение нормативов по минералам и водорастворимым витаминам, полученное за счет натуральных продуктов даже полезно, т.к. нормативы указывают на минимально необходимое количество нутриентов. А в ряде вполне обычных ситуаций – повышенные физические или психические нагрузки, неблагоприятная окружающая среда – потребности организма могут значительно превышать эти нормы. В то же время рацион BASE нельзя назвать полноценным, т.к. в нем явно недостает витаминов A и D, пантотеновой кислоты, рибофлавина, фолатов, йода, кальция, магния, хрома и цинка, а также пищевых волокон. Поэтому в нашу задачу входит не только модифицировать этот рацион таким образом, чтобы он отвечал экологическим требованиям, но и сделать его соответствующим требованиям здорового питания.

Первый из рассмотренных нами вариант экологически щадящего рациона отличается от рациона BASE только тем, что все мясные продукты и курица были заменены на мясо индейки, которое считается наиболее полезным и безопасным мясом птицы. В то же время производство мяса птицы оказывает значительно меньшее воздействие на окружающую среду, чем производство красного мяса [4]. Расчеты показывают, что нутриентный состав этого рациона практически не отличается

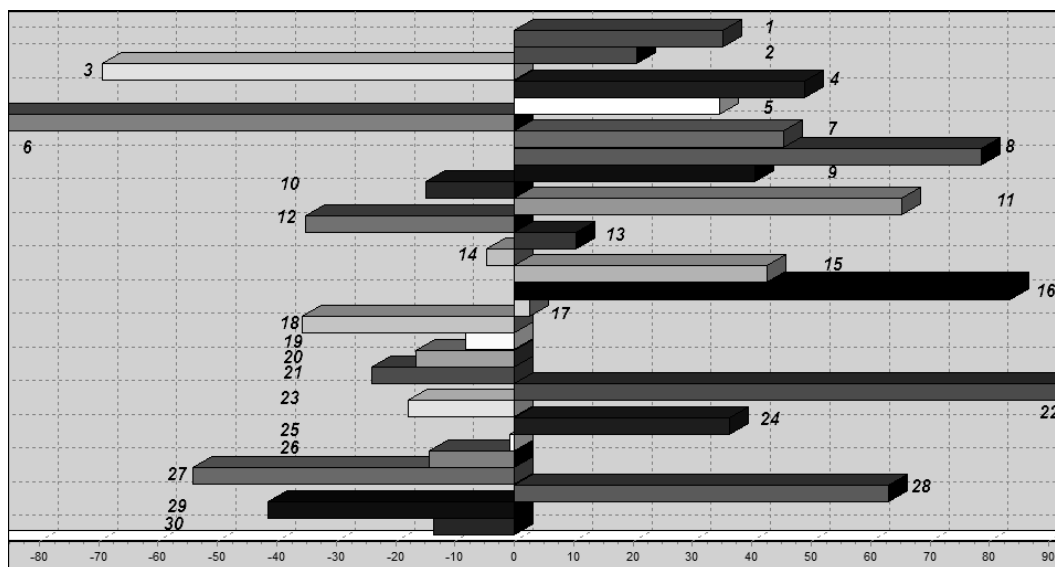


Рис. 2. Отклонения в % содержания нутриентов в рационе BASE от нормативных значений:

1 – белки, 2 – бета-каротин, 3 – витамин А, 4- витамин В12, 5.- витамин В6, 6 - витамин D, 7 – витамин Е, 8 – витамин С, 9 – железо, 10– йод, 11 – калий, 12 – кальций, 13 - липиды, 14 – магний, 15 – марганец, 16 – МНЖК, 17 – НЖК, 18 – натрий, 19 – ниацин, 20 – пантотеновая кислота, 21 – пищевые волокна, 22 – ПНЖК, 23 – рибофлавин, 24 – селен, 25 – тиамин, 26 – углеводы, 27– фолацин, 28 – фосфор, 29 – хром, 30 - цинк

от нутриентного состава рациона BASE, поэтому он здесь не приводится. Можно отметить, что в нем несколько уменьшилось количество тиамина, зато возросло содержание ниацина и селена. Таким образом, этот рацион, по крайней мере, не хуже по составу, чем рацион BASE, но более экологически приемлем.

Рацион ECO получен путем удаления из рациона BASE всех мясных продуктов с последующей оптимизацией нутриентного состава. Интерактивные возможности программы «Питание для здоровья и долголетия» использовались для изменения состава набора продуктов для оптимизации и ее ограничений, оставаясь в рамках заданных изначально условий. В процессе этих изменений мы варьировали состав набора за счет выбора разнообразных продуктов из приведенных выше групп, добавили не включенные в рекомендации орехи и некоторые популярные специи, включили оливковое масло. В результате в рационе было увеличено разнообразие овощей и зелени, расширен ассортимент овощей и фруктов, бобовых, добавлены орехи, специи и водоросли. Однако до тех пор, пока мы не включили в набор продуктов для оптимизации пророщенные зерна и микрозелень, нутриентный состав которых значительно богаче практически всех растительных продуктов, решить поставленную нами задачу оптимизации не удава-

лось. И только расширение рекомендованного МЗ набора продуктов за счет пророщенных зерен и микрозелени позволило получить оптимальный по большинству нутриентов вегетарианский рацион ECO, нутриентный состав которого представлен на рис. 3.

Оба рациона BASE и ECO имеют близкую калорийность – около 2800 ккал, соответствующую расчетной по рекомендациям МЗ [17] для взрослого трудоспособного человека, ведущего активный образ жизни. Все имеют значительный дефицит по витаминам А и Д. Но дефицит витамина А компенсируется избытком бета-каротина. В обоих рационах примерно одинаковое содержание белка. В рационе ECO, кроме этого, как и следовало ожидать, существенно снижено содержание витамина В12, что является стандартным для рационов с ограниченным количеством продуктов животного происхождения. Дефицит углеводов и насыщенных жирных кислот (НЖК) объясняется полным отсутствием в рационе дискреционных продуктов, содержащих простые сахара и насыщенные жиры (например, торт), что следует отнести к достоинствам рациона.

В отношении большинства остальных нутриентов, как видно из рис. 2, рацион ECO имеет неоспоримые преимущества перед BASE и является практически сбалансированным и полноценным,

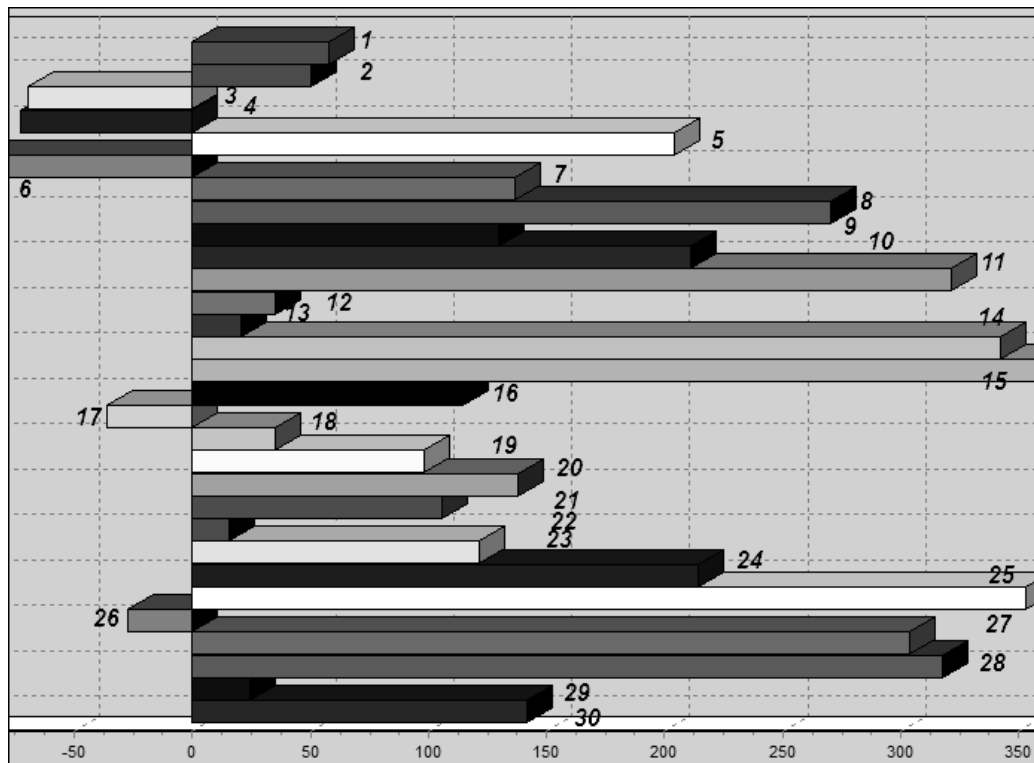


Рис. 3. Отклонения в % содержания нутриентов в рационе ЭКО от нормативных значений: 1 – белки, 2 – бета-каротин, 3 – витамин А, 4 – витамин В12, 5 – витамин В6, 6 – витамин D, 7 – витамин Е, 8 – витамин С, 9 – железо, 10 – йод, 11 – калий, 12 – кальций, 13 – липиды, 14 – магний, 15 – марганец, 16 – МНЖК, 17 – НЖК, 18 – натрий, 19 – ниацин, 20 – пантотеновая кислота, 21 – пищевые волокна, 22 – ПНЖК, 23 – рибофлавин, 24 – селен, 25 – тиамин, 26 – углеводы, 27 – фолаты, 28 – фосфор, 29 – хром, 30 – цинк

а витамины D и B12 в вегетарианских рационах обычно компенсируются добавками. Таким образом, мы показали возможность создания рациона, отвечающего экологическим требованиям, практически полноценного по нутриентному составу и, благодаря своей полноценности по витаминам и минералам, являющегося профилактическим для многих неинфекционных заболеваний [11]. В рационе преимущественно использованы обычные для населения РФ продукты питания. Проросшие ростки и микрозелень также не являются необычными продуктами питания и продаются в супермаркетах. Препятствием для широкого использования таких рационов является недостаточная осведомленность населения, необоснованно завышенные цены на овощи, фрукты и зелень, избыток дискреционных продуктов в магазинах, недобросовестная реклама, и недостатки государственной политики, направленной на профилактику болезней и оздоровление населения.

Варьируя овощи, фрукты, бобовые и орехи, пророщенные зерна, зелень и специи можно добиться большого разнообразия индивидуальных

здоровых и экологически безопасных рационов, с учетом местных условий и отвечающих заданным диетическим требованиям, а разработанный рацион может служить образцом (прототипом) для создания таких рационов.

Структурная схема роли индивидуального выбора продуктов в формировании глобального устойчивого питания (рис. 1) показывает, как массовое использование здоровых рационов могло бы повлиять не только на здоровье населения, но и на экономику и состояние окружающей среды. Благодаря наличию в схеме сложных прямых и обратных связей такое влияние могло бы приобрести устойчивый позитивный характер в образовании гармоничной структуры человек – торговля – экономика – экология – здоровье – человек. Практическая реализация этой структуры нуждается в поддержке государственной политики, направленной на конкретные меры поддержки более устойчивых моделей потребления и производства, на повышение культуры питания населения, пропаганду ЗОЖ, запрет рекламы дискреционных продуктов и введение налога на их производство. Также было

бы полезно частично заменить производство красного мяса на мясо птицы.

Заключение

Проведен анализ рекомендованного МЗ РФ рациона питания (BASE) и показана его дефицитность по ряду важных эссенциальных нутриентов. Показана возможность оптимизации данного рациона и создания на его основе рациона ЕСО, отвечающего экологическим требованиям, полноценного по нутриентному составу и, являющегося профилактическим для ряда неинфекционных заболеваний. В рационе использованы обычные для населения РФ продукты питания с обязательным включением пророщенных зерен. Препятствиями для широкого использования таких рационов является недостаточная осведомленность населения, необоснованно завышенные цены на овощи, фрукты и зелень, избыток дискреционных продуктов в магазинах. Устранению этих препятствий могла бы способствовать государственная политика в области здравоохранения и экологии.

Варьируя овощи, фрукты, бобовые и орехи, пророщенные зерна, зелень и специи можно добиться большого разнообразия индивидуальных здоровых рационов, с учетом местных условий и отвечающих заданным диетическим требованиям. Основой для создания таких рационов могут послужить средиземноморская и вегетарианская диеты.

В целом проблема может быть решена путем создания предложенной авторами сетевой технологии, поддерживающей индивидуальный выбор здорового питания [19, 20, 25]. Такая технология послужит для повышения образования населения в области питания, для повышения общей ее культуры, будет удобным средством для правильного выбора продуктов, формирования индивидуальных здоровых рационов, улучшения здоровья, а также пропаганды здорового спроса на продукты питания. В свою очередь, здоровый спрос может вызвать позитивные изменения в сельском хозяйстве, пищевой промышленности, что снизит продовольственную нагрузку на окружающую среду и улучшит экологическую обстановку, тем самым позитивно влияя на здоровье населения и внося свой вклад в решение проблемы устойчивого развития природы и общества.

Литература

1. *Tilman D., Clark M.* Global diets link environmental sustainability and human health // *Nature*. 2014. Vol. 515. N 7528. P. 518-522. doi: 10.1038/nature13959

2. *Springmann M, Wiebe K, Mason-D'Croz D, et al.* Health and nutritional aspects of sustainable diet strategies and their association with environmental impacts: a global modelling analysis with country-level detail. // *Lancet Planet Health*. 2018. Vol. 2, N10. P.451-61. doi: 10.1016/S2542-5196(18)30206-7
3. *Poore J, Nemecek T.* Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. // *Science*. 2018. Vol. 360, N 6392. P. 987-992. doi: 10.1126/science.aag0216.
4. *Clark M., Tilman D.* Comparative analysis of environmental impacts of agricultural production systems, agricultural input efficiency, and food choice. // *Environmental Research Letters*. 2017. Vol.12, N6. P. 064016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa6cd5>
5. *Corrado S., Luzzani G., Trevisan M., et al.* Contribution of different life cycle stages to the greenhouse gas emissions associated with three balanced dietary patterns. // *Sci Total Environ*. 2019. Vol. 660. P. 622-630. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.12.267/
6. *Segovia-Siapco G., Sabaté J.* Health and sustainability outcomes of vegetarian dietary patterns: a revisit of the EPIC-Oxford and the Adventist Health Study-2 cohorts // *European journal of clinical nutrition*. 2019. Vol. 72, N 1. P. 60-70.
7. *Fresán U, Sabaté J.* Vegetarian Diets: Planetary Health and Its Alignment with Human Health. *Adv Nutr*. 2019 Nov 1;10(Suppl_4):S380-S388. doi: 10.1093/advances/nmz019. PMID: 31728487; PMCID: PMC6855976.
8. *Esteve-Llorens X, Darriba C, Moreira MT, et al.* Towards an environmentally sustainable and healthy Atlantic dietary pattern: Life cycle carbon footprint and nutritional quality. // *Sci Total Environ*. 2019. Vol. 646. P.704-15. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.264.
9. *Alexandropoulou I, Goulis DG, Merou T, et al.* Basics of Sustainable Diets and Tools for Assessing Dietary Sustainability: // *A Primer for Researchers and Policy Actors*. Healthcare (Basel). 31 августа 2022 г.;10(9):1668.
10. *Кравченко А. А, Неяскина Е. В. , Ухалова Т. С. и др.* Потребление дискреционных продуктов питания: экологический, экономический и социальный каркас. // *Экономические Науки*. 2019. Вып. 174. doi: 10.14451/1.174.23.
11. *Потемкина Н.С., Крутько В.Н., Мамиконова О.А. и др.* Разработка профилактических и геропротекторных пищевых рационов, оптимизирующих продовольственную корзину на-

- селения РФ. /Вестник восстановительной медицины. 2016.№1.С.69-75.
12. Модель экологической оценки мирового животноводства (GLEAM). Доступно по:<http://www.fao.org/gleam/results/ru/> (дата обращения 23.03.2022).
13. *Muller A, Schader C, El-Hage Scialabba N, et al.* Strategies for feeding the world more sustainably with organic agriculture. *NatCommun.* 2017. Vol.8, N1. P. 1290. doi: 10.1038/s41467-017-01410-w
14. *Ван Мансвельт Я.Д., Темирбекова С.К.* Органическое сельское хозяйство: принципы, опыт и перспективы.//Сельскохозяйственная биология, 2017. Т.52. №3. С.478-486, doi: 10/15389/agrobiology/2017.3.478rus
15. *Tepper S, Kissinger M, Avital K, Shahar DR.* The Environmental Footprint Associated With the Mediterranean Diet, EAT-Lancet Diet, and the Sustainable Healthy Diet Index: A Population-Based Study. *Front Nutr.* 2022 May 19;9:870883. doi: 10.3389/fnut.2022.870883. PMID: 35662947; PMCID: PMC9161357.
16. *Gibbs J, Cappuccino FP.* Plant-Based Dietary Patterns for Human and Planetary Health. *Nutrients.* 2022 Apr 13;14(8):1614. doi: 10.3390/nut14081614. PMID: 35458176; PMCID: PMC9024616.
17. Приказ Министерства здравоохранения РФ от 19 августа 2016 г. № 614 «Об утверждении Рекомендаций по рациональным нормам потребления пищевых продуктов, отвечающих современным требованиям здорового питания». Доступно по: <https://baybuga-school.ru/doc/PrikazMINZDRAV.pdf> (дата обращения 23.03.2022).
18. Методические рекомендации МР 2.3.1.0253-21 «Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации» Доступно по: https://www.rosпотреbnadzor.ru/upload/iblock/789/1.-mr-2.3.1.0253_21-normy-pishchevykh-veshchestv.pdf (дата обращения 23.11.2022).
19. *Потемкина Н.С.* Проблема здорового питания и возможности ее решения с помощью современных компьютерных технологий.//Вестник восстановительной медицины. 2008.№ 5.С. 63-67.
20. *Потемкина Н.С., Большаков А.М., Крутько В.Н. и др.* // Информационно-компьютерная поддержка здорового питания как актуальный метод здоровьесбережения и гигиены питания в современных экологических условиях.//Гигиена и санитария. 2017. Т. 96. № 11. С. 1078-1083.
21. Химический состав Российских продуктов питания./Под. ред. И.М. Скурихина, В.А. Тутельяна. М. 2002.
22. USDA National Nutrient Database for Standard Reference. Retrieved from <http://www.ars.usda.gov/Services/docs.htm?docid=8964> (дата обращения 23.03.2022).
23. *Chungchunlam SMS, Garrick DP, Moughan PJ.* Using Linear Programming to Determine the Role of Plant- and Animal-Sourced Foods in Least-Cost, Nutritionally Adequate Diets for Adults. *Curr Dev Nutr.* 2021 Nov 3;5(11):nzab132. doi: 10.1093/cdn/nzab132.
24. *Van Dooren C.* A Review of the Use of Linear Programming to Optimize Diets, Nutritiously, Economically and Environmentally. *Front Nutr.* 2018 Jun 21;5:48. doi: 10.3389/fnut.2018.00048.
25. *Крутько В.Н., Большаков А.М., Брико И. др.* Интеллектуальная система здоровьесбережения - ИнСиЗ // Вестник восстановительной медицины. 2018.№1.С.14-20.

Потемкина Наталия Серафимовна. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук г. Москва, Россия. Старший научный сотрудник. Кандидат биологических наук. Количество печатных работ: 99. Область научных интересов: информационные технологии, здоровый образ жизни, экология. E-mail: nsputyomkina@mail.ru (Ответственный за переписку).

Крутько Вячеслав Николаевич. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук г. Москва, Россия. Главный научный сотрудник, и.о. зав. Отделом. Доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры общей гигиены Института общественного здоровья Сеченовского Университета. Количество печатных работ: 346. Область научных интересов: системный анализ и информационные технологии для управления здоровьем и старением. E-mail: krutkovn@mail.ru

Халявкин Александр Викторович. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, г. Москва, Россия. Старший научный сотрудник. Кандидат биологических наук. Количество печатных работ: 50. Область научных интересов: информационные технологии, здоровый образ жизни, геронтология. E-mail: antisenes@mail.ru.

Маркова Анна Михайловна. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, г. Москва, Россия. Старший инженер. Количество печатных работ: 4. Область научных интересов: информационные технологии здоровьесбережения. E-mail: amarkova@gmail.com

The problem of food ecology: system analysis and its solution

N.S. Potemkina, V.N. Krut'ko, A.V. Khalyavkin, A.M. Markova

Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. There is a relationship between human health and the environment. The paper presents the results of a systems analysis of the relationship between individual nutrition, ecology and economics. The possibility of creating and introducing into everyday practice healthy, balanced, full-fledged, preventive and meeting modern environmental requirements diets based on the choice of typical Russian food products is substantiated. The widespread distribution of such diets with the help of network technologies can contribute to solving the problems of sustainable development of nature and society.

Keywords: *health, ecology; sustainable nutrition; the impact of diet on the environment; computer optimization of diets.*

DOI: 10.14357/20790279230210

References

1. Tilman D., Clark M. Global diets link environmental sustainability and human health //Nature. 2014. Vol. 515. N 7528. P. 518-522. doi: 10.1038/nature13959
2. Springmann M, Wiebe K, Mason-D'Croz D, et al. Health and nutritional aspects of sustainable diet strategies and their association with environmental impacts: a global modelling analysis with country-level detail. //Lancet Planet Health. 2018. Vol. 2, N10. P.451-61. doi: 10.1016/S2542-5196(18)30206-7
3. Poore J, Nemecek T. Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. // Science. 2018. Vol. 360, N 6392. P. 987-992. doi: 10.1126/science.aag0216.
4. Clark M., Tilman D. Comparative analysis of environmental impacts of agricultural production systems, agricultural input efficiency, and food choice. //Environmental Research Letters.2017. Vol.12, N6. P. 064016 <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa6cd5>
5. Corrado S., Luzzani G., Trevisan M., et al. Contribution of different life cycle stages to the greenhouse gas emissions associated with three balanced dietary patterns. //Sci Total Environ. 2019. Vol. 660. P. 622-630. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.12.267/
6. Segovia-Siapco G., Sabaté J. Health and sustainability outcomes of vegetarian dietary patterns: a revisit of the EPIC-Oxford and the Adventist Health Study-2 cohorts //European journal of clinical nutrition. 2019.Vol. 72, N 1. P. 60-70.
7. Fresán U, Sabaté J. Vegetarian Diets: Planetary Health and Its Alignment with Human Health. Adv Nutr. 2019 Nov 1;10(Suppl_4):S380-S388. doi: 10.1093/advances/nmz019. PMID: 31728487; PMCID: PMC6855976.
8. Esteve-Llorens X, Darriba C, Moreira MT, et al. Towards an environmentally sustainable and healthy Atlantic dietary pattern: Life cycle carbon footprint and nutritional quality.//Sci Total Environ. 2019. Vol. 646. P.704-15. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.264.
9. Alexandropoulou I, Goulis DG, Merou T, et al. Basics of Sustainable Diets and Tools for Assessing Dietary Sustainability: //A Primer for Researchers and Policy Actors. Healthcare (Basel). 31.08.2022. 10(9):1668.
10. Kravchenko A. A, Neyaskina E. V., Uhalova T. S., et al. Potreblenie diskreionnyh produktov pitaniya: ekologicheskij, ekonomicheskij i social'nyj karkas.// Ekonomicheskie Nauki, vyp. 174, 2019. doi: 10.14451/1.174.23
11. Potemkina N.S., Krut'ko V.N., Mamikonova O.A., et al. Razrabotka profilakticheskikh i geroprotekturnykh pishchevyh racionov,

- optimiziruyushchih prodovol'stvennyuyu korzinu naseleniya RF [Development of preventive and geroprotective food rations optimizing the food basket of the population of the Russian Federation.] *Vestnik vosstanovitel'noj mediciny*. [Bulletin of Rehabilitation Medicine]. 2016. N 1. P. 69-75. (in Russian)
12. Global Livestock Environmental Assessment Model (GLEAM) Available at: <https://www.fao.org/gleam/results/en/> (accessed 13.06.2022).
13. Muller A, Schader C, El-Hage Scialabba N, et al. Strategies for feeding the world more sustainably with organic agriculture. *Nat Commun*. 2017. Vol.8, N1. P. 1290. doi: 10.1038/s41467-017-01410-w
14. Van Mansvel't YA.D., Temirbekova S.K. Organicheskoe sel'skoe hozyajstvo: principy, opyt i perspektivy [Organic agriculture: principles, experience and perspectives] // *Sel'skohozyajstvennaya biologiya* [Agricultural biology] 2017. Vol. 52, N 3. P. 478-486, doi: 10.15389/agrobiology/2017.3.478rus (in Russian)
15. Tepper S, Kissinger M, Avital K, Shahar DR. The Environmental Footprint Associated With the Mediterranean Diet, EAT-Lancet Diet, and the Sustainable Healthy Diet Index: A Population-Based Study. *Front Nutr*. 2022 May 19;9:870883. doi: 10.3389/fnut.2022.870883. PMID: 35662947; PMCID: PMC9161357.
16. Gibbs J, Cappuccino FP. Plant-Based Dietary Patterns for Human and Planetary Health. *Nutrients*. 2022 Apr 13;14(8):1614. doi: 10.3390/nu14081614. PMID: 35458176; PMCID: PMC9024616.
17. Prikaz Ministerstva zdravoohraneniya RF ot 19 avgusta 2016 g. № 614 "Ob utverzhdenii Rekomendacij poracional'nykh normam potrebleniya pishchevykh produktov, otvechayushchih sovremennym trebovaniyam zdorovogo pitaniya". (in Russian) Available at: <https://baybuga-school.ru/doc/PrikazMINZDRAV.pdf> (accepted 13.06.2022).
18. Metodicheskie rekomendatsii MP 2.3.1.0253-21 "Normy fiziologicheskikh potrebnostej v energii i pishchevykh veshchestvakh dlya razlichnykh grupp naseleniya Rossijskoj Federacii" [Guidelines MP 2.3.1.0253-21 "Norms of physiological needs for energy and nutrients for various groups of the population of the Russian Federation"]
19. Potemkina N.S. Problema zdorovogo pitaniya i vozmozhnosti ee resheniya s pomoshch'yu sovremennykh komp'yuternykh tekhnologij [The problem of healthy nutrition and the possibility of its solution with the help of modern computer technologies.] // *Vestnik vosstanovitel'noj mediciny* [Bulletin of Rehabilitation Medicine]. 2008. N5. P. 63-7. (in Russian)
20. Potemkina N.S., Bolshakov A.M., Krutko V.N. i dr. // *Informacionno-komp'yuternaya podderzhka zdorovogo pitaniya kak aktual'nyj metod zdorov'esberezheniya i gigieny pitaniya v sovremennykh ekologicheskikh usloviyah* [Information-computer support of healthy nutrition as an actual method of health saving and food hygiene in modern environmental conditions]. // *Gigiena i sanitariya* [Hygiene and Sanitation]. 2017. Vol. 96. No 11. P. 1078-1083. <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-11>. (in Russian)
21. Skurihin I.M., Tutelyan V.A. Himicheskij sostav rossijskikh produktov pitaniya [Chemical composition of Russian food products]. 2002 (in Russian).
22. USDA National Nutrient Database for Standard Reference. Retrieved from <http://www.ars.usda.gov/Services/docs.htm?docid=8964> (дата обращения 23.03.2022).
23. Chungchunlam SMS, Garrick DP, Moughan PJ. Using Linear Programming to Determine the Role of Plant- and Animal-Sourced Foods in Least-Cost, Nutritionally Adequate Diets for Adults. *Curr Dev Nutr*. 2021 Nov 3;5(11):nzab132. doi: 10.1093/cdn/nzab132.
24. van Dooren C. A Review of the Use of Linear Programming to Optimize Diets, Nutritiously, Economically and Environmentally. *Front Nutr*. 2018 Jun 21;5:48. doi: 10.3389/fnut.2018.00048.
25. Krutko V.N., Bolshakov A.M., Briko A.N., et al. Intellektual'naya sistema zdorov'esberezheniya - InSiZ [Intellectual health saving system - InSiZ]. // *Vestnik vosstanovitel'noy meditsiny* [Bulletin of Rehabilitation Medicine]. 2018. N1. P.14-20 (in Russian).

Potemkina Natalia Serafimovna. Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. Senior Researcher, Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher. Number of publications: 99. Research interests: information technology, healthy lifestyle, ecology. E-mail: nspotyomkina@mail.ru (Responsible for correspondence).

Krut'ko Vyacheslav Nikolaevich. Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. Chief Researcher, Acting Head. Department. Doctor of Technical Sciences, Professor. Professor (part-time) of the Department of General Hygiene of the Institute of Public Health of Sechenov University. Number of publications: 346. Research interests: system analysis and information technologies for health and aging management. E-mail: krutkovn@mail.ru

Khalyavkin Alexander Viktorovich. Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. Senior researcher, Candidate of Biological Sciences. Number of printed works: 50. Research interests: information technology, healthy lifestyle, gerontology. E-mail: antisenesc@mail.ru.

Markova Anna Mikhailovna. Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. Senior engineer. Number of publications: 4. Area of scientific interests: health-saving information technologies. E-mail: amarkova@gmail.com

Выявление факторов риска острых нарушений мозгового кровообращения на основе интеллектуального анализа историй болезни*

В.В. Донитова, Д.А. Киреев, Б.А. Кобринский, И.В. Смирнов, Е.В. Титова

Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», г. Москва, Россия

Аннотация. Инсульт занимает второе место в мире среди причин смертности и третье место среди причин инвалидности и смертности вместе взятых. При этом среди факторов риска возникновения инсульта имеются потенциально управляемые, т.е. возможна профилактика данного заболевания. Выявление ранее неизвестных модифицируемых факторов риска инсульта или проверка значимости известных факторов являются актуальными задачами, которые можно решать на основе ретроспективного анализа историй болезни пациентов с этим заболеванием. В работе представлен подход к выявлению факторов риска острых нарушений мозгового кровообращения из текстов историй болезни с применением методов обработки естественного языка и машинного обучения. Предложенный подход позволил определить факторы риска инфаркта мозга и транзиторной ишемической атаки у пациентов одной из федеральных клиник. Выявленные факторы в целом согласуются с полученными в других исследованиях.

Ключевые слова: факторы риска, инсульт, извлечение информации из текстов, машинное обучение, истории болезни.

DOI: 10.14357/20790279230211

Введение

В большинстве развитых стран, где длительное время уделяли большое внимание совершенствованию мер предотвращения заболеваний, а не только их лечению, произошли значительные положительные сдвиги в показателях смертности от сосудистых заболеваний, что в результате и определило большой отрыв в продолжительности жизни и эффективности борьбы с основными хроническими неинфекционными заболеваниями (ХНИЗ) [1]. Возможности динамического контроля за факторами риска развития ХНИЗ с использованием интеллектуальной системы рассмотрены на примере кардио- и церебральной сосудистой патологии в [2]. Но важным и недоурешенным вопросом является выявление таких факторов в электронных медицинских картах (ЭМК), в частности в историях болезни стационарных больных, что является сложной задачей ввиду слабой структурированности медицин-

ских документов, синонимии, произвольного использования сокращений и др.

Особое значение своевременное выявление факторов риска имеет для социально значимых заболеваний, одним из которых является инсульт. По последним данным инсульт занимает второе место в мире среди причин смертности и третье место среди причин инвалидности и смертности вместе взятых [3]. При проведении системного анализа ОНМК, по данным за 1990-2016 гг., обнаружено, что в 87,9% случаев ишемического инсульта и 89,5% геморрагического инсульта имели место потенциально модифицируемые факторы риска [4]. Показано, что контроль модифицируемых факторов позволяет снизить риск инсульта [5,6]. Поэтому выявление модифицируемых (управляемых) факторов риска является актуальной задачей.

Такой анализ возможен с использованием технологий и методов искусственного интеллекта для извлечения знаний из текстов на естественном языке в массиве электронных медицинских карт. Исследования в этом направлении важны, так как нет чётких рекомендаций, какой из алго-

* Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-01090 мк.

ритмов будет работать лучше в той или иной ситуации в такой слабо структурированной области как медицина [7].

В настоящей работе решается задача выявления риск-факторов острых нарушений мозгового кровообращения при помощи извлечения потенциальных факторов из текстовых (неструктурированных) историй болезни с последующим выделением значимых показателей и их комбинаций методами машинного обучения.

1. Подходы к интеллектуальному анализу разнородных медицинских данных

Данные о состоянии здоровья людей хранятся в ЭМК в разных форматах. Это, как правило, структурированные и неструктурированные текстовые данные, а также изображения. В зависимости от степени структурированности данных применяются различные подходы к их обработке. В работе [8] представлен один из последних обзоров работ по применению искусственного интеллекта (ИИ) к обработке данных ЭМК. В частности, авторы отмечают недавние работы о применении ИИ для задачи прогнозирования появления таких заболеваний как сахарный диабет и гипертония, а также для предсказания риска остановки сердца. Особенно отмечена необходимость разработки специальных процедур и политик для корректного сбора и обработки медицинских данных с помощью ИИ.

В российском исследовании на данных 2131 человека методом машинного обучения с использованием нейронной сети осуществлялось прогнозирование исходов и рисков сердечно-сосудистых заболеваний у пациентов с артериальной гипертонией [9]. В работе Баранова А.А. и др. [10] в ходе комплексного анализа медицинских данных применялись методы извлечения информации из текстов и машинного обучения на основе деревьев решений. В результате исследования была показана целесообразность использования подобных комплексных решений для анализа медицинских текстов и данных для выделения наиболее значимых признаков для предсказания диагноза.

Обработка текстовой составляющей электронных медицинских карт является отдельной задачей. Проблемы в этой области хорошо описаны, например, в работе М. Тауефи и др. [11]. Основной и главной проблемой здесь является специфика медицинских текстов, из-за чего такие задачи как токенизация, раскрытие сокращений и исправление ошибок становятся сложнее, потому что они требуют либо значительной модификации существующих

решений, либо создания совершенно новых решений, уникальных для каждого исследования.

Большинство современных исследований в области интеллектуального анализа медицинских текстов основаны на применении машинного обучения по размеченным корпусам текстов, в связи с чем роль последних сильно возросла. Стали появляться такие корпуса и для русскоязычных медицинских текстов. В работе [12] представлен один из первых русскоязычных размеченных корпусов клинических текстов, а также методы извлечения и связывания различных медицинских сущностей из текстов. В одной из последних работ Р. Blinov и др. [13] для оценки работы методов обработки текстов медицинской тематики представлен русскоязычный набор тестов RuMedBench. В данный набор входят тесты по их классификации, ответу типа да/нет на контекстные вопросы, созданию выводов (Natural Language Inference, NLI) и извлечение именованных сущностей (NER) для текстов медицинской тематики на русском языке. Параллельно происходит и развитие т. н. нейросетевых языковых моделей. Так, в работе А. Yalunin и др. [14] была представлена модель RuBioRoBERTa, которая представляет собой модель RoBERTa [15], дообученную на текстах биомедицинской тематики на русском языке. Такая модель показала лучшее качество на наборе тестов RuMedBench [13].

При анализе медицинских структурированных данных важна задача выявления причинно-следственных отношений в данных. Для решения такого рода используются логические (индуктивные) методы машинного обучения. Например, в работе [16] описан один из таких методов – AQJSM, который применялся, например, для исследования связи агрессивности с различными личностными особенностями [17]. Он применялся также и в настоящей работе для выявления значимых факторов риска острых нарушений мозгового кровообращения.

2. Схема исследования

Данное исследование проводилось по следующей схеме:

1. Создание обезличенной выборки ЭМК (историй болезни) для 3-х групп пациентов: с ишемическим инсультом (инфаркт мозга), транзиторной ишемической атакой (ТИА) и контрольной группы (с отсутствием в анамнезе любой из форм инсульта).
2. Формирование выборки историй болезни для разметки, обучения и тестов.
3. Формирование перечня показателей, которые рассматривались в качестве потенциальных

факторов риска острых нарушений мозгового кровообращения.

4. Разметка ранее отобранной выборки текстов историй болезни экспертами.
5. Обучение методов извлечения потенциальных факторов риска на размеченной выборке.
6. Извлечение потенциальных факторов риска из всех имеющихся текстов обученными ранее методами.
7. Группирование потенциальных факторов по историям болезни пациентов с различными диагнозами. Нормализация классов по количеству экземпляров путем удаления лишних экземпляров.
8. Применение методов машинного обучения к полученной ранее выборке потенциальных факторов для извлечения значимых факторов риска острых нарушений мозгового кровообращения.
9. Анализ и интерпретация полученных результатов экспертами-медиками.

3. Исходные данные для выявления потенциальных факторов риска

3.1. Материал исследования

В качестве материала для исследования факторов риска выступили обезличенные ЭМК пациентов Федерального научно-клинического центра Федерального медико-биологического агентства (ФНКЦ ФМБА). Материал исследования первоначально включал ЭМК пациентов с ишемическим инсультом (инфаркт мозга), геморрагическим инсультом, транзиторной ишемической атакой (ТИА) и контрольную группу, в которой отсутствовали диагнозы любой из форм инсульта. Однако вследствие крайне малого числа ЭМК с диагнозом геморрагического инсульта, последующий анализ проводился только в отношении инфаркта мозга и ТИА.

Исследуемая выборка состояла из 1235 ЭМК, принадлежащих 328 пациентам, среди которых 220 (67%) – с диагнозом ишемический инсульт, 108 (33%) – транзиторная ишемическая атака. Эти пациенты подходили по нескольким критериям отбора. У каждого пациента было не менее двух госпитализаций, при последней из которых поставлен целевой диагноз (ишемический инсульт или ТИА). В качестве еще одного условия был определен временной интервал с 01.01.2009 года по 31.05.2019 года, в течение которого пациентам оказывалась медицинская помощь в ФНКЦ ФМБА. Такие границы обусловлены тем, что в течение последних 10 лет методы диагностики нарушений мозгового кровообращения и подходы

к ведению историй болезни в ФНКЦ ФМБА практически не изменялись.

В контрольную выборку вошли пациенты, которые обращались в ФНКЦ ФМБА по медицинским показаниям или для плановых обследований, операций. Ни у одного из участников контрольной группы в анамнезе или в момент госпитализации не было ишемического инсульта или ТИА. Контрольная группа состояла из 1654 ЭМК, принадлежащих 500 пациентам.

Все пациенты, в соответствии с временем постановки им целевого диагноза, были разделены на 3 группы: пациенты моложе 40 лет, от 40 до 60 и старше 60 лет. Среди больных ишемическим инсультом большую часть составляли пациенты старше 60 лет – 177 (80,5%), среди больных ТИА большую часть составляли пациенты в возрасте от 40 до 60 лет – 53 (49,1%).

3.2. Показатели, исследуемые в качестве потенциальных факторов риска инсульта

На основе анализа литературных данных был сформирован список диагнозов и признаков, подлежащих извлечению из электронных медицинских карт пациентов как потенциальные факторы риска инсульта. Он включал 6 сущностей: артериальная гипертензия (АГ), ишемическая болезнь сердца (ИБС), головокружение, сахарный диабет (СД), аритмия, стеноз магистральных артерий головы и шеи (стеноз МАГ). Кроме того, исследовалась информация о лабораторном показателе «Скорость оседания эритроцитов» (СОЭ), повышение которого может свидетельствовать о наличии генерализованного воспаления в организме, что может указывать на его роль как триггера при инсульте [18]. Измерение СОЭ обычно происходит с помощью одного из методов: по Вестергрену или по Панченкову. Так как нормальные значения для этих методик различаются, это было необходимо учитывать при выделении показателей, указывающих на повышение СОЭ. По Вестергрену для женщин моложе 50 лет, повышением СОЭ считаются значения больше 20 мм/ч, для женщин старше 50 – больше 30 мм/ч, для мужчин моложе 50 и старше 50 – больше 15 мм/ч и больше 20 мм/ч. По Панченкову значения СОЭ отмечаются как повышенные при значениях больше 12 мм/ч для женщин и больше 10 мм/ч для мужчин.

3.3 Разметка текстов историй болезни

Из сформированной на первом шаге выборки ЭМК была отобрана 661 история болезни, необходимая для разметки с целью обучения и проверки методов извлечения информации из текстов.

В текстах историй болезни размечались перечисленные выше потенциальные факторы риска в

Табл. 1

Количество размеченных факторов в текстах ИБ

Название потенциального фактора	Количество вхождений
Артериальная гипертония	1064
Стеноз	788
Аритмия	389
Ишемическая болезнь сердца	814
Головокружение	213
Сахарный диабет	342
Скорость оседания эритроцитов	289

соответствии со схемой, описанной в наших предыдущих публикациях [19,20]. В табл. 1 представлено количество размеченных вхождений каждого фактора.

4. Извлечение целевой информации из текстов историй болезни

Для извлечения потенциальных факторов риска из текстов ЭМК использовались методы, основанные на машинном обучении и описанные ранее в работе [19], с некоторой модификацией:

- для метода, основанного на глубоком обучении, рассматривалась дополнительная модель RuBioRoBERTa [14], предобученная на текстах медицинской тематики. Следствием использова-

ния этой модели явилось повышение точности извлечения признаков;

- для оценки результатов работы методов использовалась библиотека seqeval [21], которая специализируется на задачах маркировки последовательностей. Использование этой библиотеки позволило более точно оценить качество работы методов и дало возможность сравнения методов друг с другом.

В табл. 2 приведены результаты оценки качества работы модифицированных методов на размеченной тестовой выборке текстов. Для работы методов, основанных на CRF и BERT, были подобраны гиперпараметры для максимизации оценки F_1 на 100 итерациях. Для каждого фактора был выделен метод, лучше всего извлекающий этот фактор по оценке F_1 .

Как видно из табл. 2, для 5 из 7 исследуемых факторов лучше всего показал себя метод, основанный на RuBERT и RuBioRoBERTa.

Извлечение потенциальных факторов риска инсульта выполнялось на всей выборке исходных данных, описанной в Разделе 3.1. Для извлечения каждого потенциального фактора на новых неразмеченных данных использовался метод, показавший лучшее качество на тестовой выборке текстов для данного фактора.

Табл. 2

Результаты оценки качества методов извлечения информации из текстов, значения в %

Основа метода / Фактор		АГ	Стеноз МАГ	Аритмия	ИБС	Головокружение	СД	СОЭ
Правила	Precision	98,80	89,62	55,81	52,94	91,41	91,12	60,65
	Recall	85,42	29,57	50,64	71,16	84,98	92,98	65,28
	F1	91,62	44,47	53,10	60,71	88,08	92,04	62,88
	Accuracy	98,77	95,79	93,37	95,97	99,12	99,28	99,28
CRF	Precision	95,92	94,07	73,81	77,06	93,94	96,19	69,79
	Recall	92,68	91,19	74,40	74,65	88,57	87,83	96,79
	F1	94,27	92,61	74,10	75,84	91,18	91,82	96,79
	Accuracy	99,41	99,18	95,78	97,81	99,52	99,21	99,44
BERT (Ru-BERT)	Precision	97,00	91,40	72,73	77,96	93,75	93,26	72,20
	Recall	97,47	91,88	75,82	83,06	94,24	92,22	70,00
	F1	97,30	91,64	74,24	80,43	94,00	92,73	71,08
	Accuracy	99,76	99,15	96,59	97,43	99,48	99,37	99,06
BERT (RuBio-RoBERTa)	Precision	96,31	92,08	71,71	82,9	91,53	92,86	73,42
	Recall	95,74	90,48	82,30	83,38	91,05	94,27	75,65
	F1	96,03	91,27	76,64	83,14	91,29	93,56	74,52
	Accuracy	99,60	99,22	96,38	97,85	99,21	99,27	99,09

Табл. 3

Процентные отношения встречаемости потенциальных факторов риска для каждого из диагнозов

Потенциальный фактор риска или комбинация факторов		Процентное отношение встречаемости записей о потенциальном факторе риска к общему количеству записей с диагнозом «Инфаркт мозга»	Процентное отношение встречаемости записей о потенциальном факторе риска к общему количеству записей с диагнозом «ТИА»
Аритмия		56,82%	67,59%
СД		19,55%	10,19%
ИБС		68,64%	87,04%
АГ		92,73%	91,67%
Головокружение		52,27%	69,44%
Стеноз МАГ		71,82%	61,11%
АГ и стеноз МАГ		55,00%	48,15%
АГ и аритмия		44,55%	53,70%
АГ и СД		14,09%	8,33%
АГ и ИБС		58,18%	78,70%
Стеноз МАГ и аритмия		29,55%	35,19%
Стеноз МАГ и диабет		8,18%	2,78%
Стеноз МАГ и ИБС		34,55%	49,07%
Аритмия и СД		6,82%	6,48%
Аритмия и ИБС		32,27%	50,93%
СД и ИБС		6,82%	5,56%
АГ, стеноз МАГ и аритмия		22,73%	28,70%
АГ, стеноз МАГ и СД		4,55%	2,78%
АГ, стеноз МАГ и ИБС		28,18%	40,74%
АГ, аритмия и СД		4,55%	4,63%
АГ, аритмия и ИБС		26,82%	45,37%
АГ, СД и ИБС		5,91%	5,56%
Стеноз МАГ, аритмия и СД		2,27%	1,85%
Стеноз МАГ, аритмия и ИБС		15,00%	30,56%
Стеноз МАГ, СД и ИБС		3,18%	2,78%
Аритмия, СД и ИБС		1,82%	4,63%
Возраст	<40	0,45%	8,33%
	40-60	19,09%	49,07%
	>60	80,45%	42,59%

Предварительно проведенный частотный анализ показал, что при инфаркте мозга, по сравнению с ТИА, значительно чаще встречаются такие факторы как артериальная гипертензия (32,59% против 15,81%), стеноз магистральных сосудов шеи и головы (30,56% против 12,77%), аритмии (28,54% против 16,67%), ишемическая болезнь сердца (28,49% против 17,74%) и сахарный диабет (35,25% против 9,02%). Это указывает на больший или меньший негативный вклад факторов риска в сравнительном анализе этих двух форм острого нарушения мозгового кровообращения, обусловленных спазмом сосудов мозга.

Показано, что при сочетании двух и более неблагоприятных факторов вероятность возникновения инсульта увеличивается [22]. Поэтому нами были построены комбинации из двух и трех факторов, включающих уже отобранные

признаки (артериальная гипертензия, стеноз магистральных сосудов, аритмия, сахарный диабет, ИБС). Особое внимание уделено высокой встречаемости автоматически выявленных комбинаций факторов риска для инфаркта мозга, по сравнению с ТИА, для стеноза МАГ и СД (40,00% против 6,67%) и для АГ, стеноза МАГ и СД (41,67% против 12,50%).

Более существенным является анализ отношения количества записей, в которых встречается тот или иной фактор или комбинация факторов риска, к общему количеству записей с тем или иным диагнозом (табл. 3).

Оценка частоты встречаемости каждого из потенциальных факторов риска в процентном отношении при каждом из диагнозов (табл. 3) позволяет сделать предварительное заключение о возможном значении рассматриваемых факторов

и их сочетаний. Преобладающий возраст старше 60 лет практически в 2 раза чаще встречается при инфаркте мозга, чем при ТИА, что подтверждает известный факт. ИБС и аритмия несколько чаще приводят к ТИА, при которой и более высокая частота головокружения, что имеет соответствующее содержательное объяснение. Стеноз магистральных сосудов головы и шеи и сахарный диабет чаще встречаются при инфаркте мозга, в частности и потому, что контингент этих больных в целом старше. При рассмотрении комбинаций факторов риска можно видеть, что при инфаркте мозга значительно чаще, чем при ТИА, имеют место такие сочетания как АГ + СД, стеноз МАГ + СД, АГ + стеноз МАГ + СД. В то время как при ТИА чаще встречаются следующие сочетания: АГ + ИБС, стеноз МАГ + аритмия, аритмия + ИБС, АГ + стеноз МАГ + ИБС, АГ + аритмия + ИБС, стеноз МАГ + аритмия + ИБС. Большинство этих комбинаций факторов риска отвечает содержательным представлениям. Частично оно объясняется коморбидностью патологии, нарастающей с возрастом (включая как увеличение тяжести ранее возникших патологических проявлений и заболеваний, так и появление новых хронических болезней).

5. Выявление факторов риска нарушения мозгового кровообращения

Следующий этап исследования был направлен на переход от анализа частотных характеристик извлеченных из историй болезни потенциальных факторов риска к выявлению значимых факторов риска нарушения мозгового кровообращения методами машинного обучения. Учитывая существующие явные и скрытые связи факторов (каузальные, ассоциативные), совместно влияющих на развитие патологических процессов, существовала необходимость рассмотрения каждого из

потенциальных факторов риска в отдельности и в разных комбинациях.

Для выявления факторов риска болезней, связанных с нарушением мозгового кровообращения, были выбраны следующие методы: AQJSM [16], ориентированный на поиск причинно-следственных связей, регрессионная модель и дерево принятия решений. Данные методы были выбраны в связи с большими возможностями интерпретации, в отличие от, например, моделей глубокого обучения, интерпретация которых сильно затрудняется большим количеством параметров и слоев.

Рассмотрим далее результаты применения выбранных методов.

Метод AQJSM не выдал гипотез о факторах риска для инсульта, что можно объяснить большим сходством исследуемых целевых групп с контролем.

Модель логистической регрессии использует все данные, подаваемые на вход, но для интерпретации были выделены 8 наиболее значимых признаков. В табл. 4 представлены результаты анализа для пациентов с диагнозом «Инфаркт мозга». В табл. 5 – результаты анализа для пациентов с диагнозом «ТИА». Если признак отмечен символом «+», то это означает, что он может рассматриваться как фактор риска для данного диагноза (заболевания), символ «-» указывает на отсутствие влияния (или слабое влияние). Как видно, в качестве факторов риска для ишемического инсульта выделены: артериальная гипертензия, аритмия, стеноз магистральных артерий головы и шеи, сахарный диабет, ишемическая болезнь сердца и возраст старше 60 лет. В то время как для ТИА характерны следующие факторы (в отдельности и в комбинации): АГ, головокружение, АГ+ИБС, стеноз МАГ+ИБС, стеноз МАГ+аритмия+ИБС, при возрасте до 60 лет.

Для данного метода можно утверждать, что чем больше у пациента факторов с плюсом, тем больше вероятность, что обученная модель логи-

Табл. 4

Результаты применения регрессионной модели для пациентов с диагнозом «Инфаркт мозга»

Фактор		Инфаркт мозга
Возраст	<40 лет	-
	40–60 лет	-
	>60 лет	+
Стеноз МАГ и ИБС		-
Аритмия		+
АГ		+
Стеноз МАГ		+
СД		+
ИБС		+
АГ, стеноз МАГ и ИБС		-

Табл. 5

Результаты применения регрессионной модели для пациентов с диагнозом «ТИА»

Фактор		Транзиторная ишемическая атака
АГ и ИБС		+
Головокружение		+
Возраст	<40 лет	+
	40-60 лет	+
	>60 лет	-
Стеноз МАГ, аритмия и ИБС		+
Стеноз МАГ и аритмия		-
АГ		+
Стеноз МАГ		-
Стеноз МАГ и ИБС		+
Аритмия и ИБС		-

стической регрессии предскажет истинный риск для соответствующего диагноза.

Применение метода построения дерева решений продемонстрировало следующие результаты: для «Инфаркт мозга», в отличие от «ТИА», выявлено присутствие такого показателя как СОЭ, который рассматривается как возможный триггер развития инсульта. Невыявление СОЭ для «ТИА» указывает на отсутствие воспалительного процесса (маркером которого является СОЭ), что соответствует клинической картине ТИА.

6. Обсуждение результатов

Метод логистической регрессии показал наиболее адекватные результаты. С помощью метода логистической регрессии в качестве факторов риска для ишемического инсульта выделены: артериальная гипертония, аритмия, стеноз магистральных артерий головы и шеи, сахарный диабет, ишемическая болезнь сердца и возраст старше 60 лет. Их частота у пациентов с ишемическим инсультом в анализируемой выборке: артериальная гипертония 93% случаев, стеноз магистральных артерий головы – 72%, ишемическая болезнь сердца – 69%, аритмия – 57%, головокружение – 52%, сахарный диабет – 20%.

Для ТИА характерны следующие факторы (в отдельности и в комбинации): АГ, головокружение, АГ+ИБС, стеноз МАГ+ИБС, стеноз МАГ+аритмия+ИБС, при возрасте до 60 лет.

Помимо факторов риска, которые могут привести к развитию острого нарушения мозгового кровообращения, с помощью метода дерева принятия решений, был выделен маркер, который может указывать на возникновение нарушения мозгового кровоснабжения вследствие ассоциации с инфекциями, – «повышение скорости оседания эритроцитов (СОЭ)» [23]. Повышение СОЭ было зафиксировано у 20,9% пациентов.

Обратимся к сравнительному анализу факторов риска, полученных в процессе извлечения знаний из текстов в настоящем исследовании, с некоторыми аналогичными отечественными и зарубежными исследованиями. В исследовании INTERSTROKE [24], охватывающем практически все континенты, гипертония была значимо связана со всеми формами инсульта во всех регионах. В немецком исследовании [25] авторы указывают на наличие классических факторов риска, таких как гипертония и сахарный диабет, что подтверждает и наше исследование. В Японии гипертония также постоянно ассоциируется с повышенным риском инсульта независимо от возрастной категории, а сахарный диабет связан с повышенным риском инсульта в возрасте 60–74 лет, но не у лиц в возрасте ≥ 75 лет [26]. В российском исследовании [27] аритмия продемонстрировала встречаемость более, чем в 50% случаев. Таким образом, артериальная гипертония и сахарный диабет, как ведущие факторы риска ишемического инсульта, были подтверждены при анализе массива историй болезни ФНКЦ ФМБА. Другие рассмотренные факторы характеризуются определенной вариабельностью при инфаркте мозга и ТИА.

Заключение

В работе продемонстрирована возможность извлечения из неструктурированных текстов историй болезни потенциальных факторов риска нарушения кровообращения мозга и выявления среди них наиболее значимых в плане реализации предрасположения к заболеванию. Для этого использовались современные методы извлечения информации из текстов, включая нейросетевые языковые модели типа трансформер. Экспериментальная проверка показала достаточно высокое качество работы указанных методов. Для выявления и оценки влияния факторов

риска на развитие ишемического инсульта и ТИА использовался метод логистической регрессии, метод построения дерева решений и AQJSM. Лучшие результаты показал метод логистической регрессии. С использованием этого метода для ишемического инсульта выявлены такие факторы как возраст старше 60 лет, артериальная гипертензия, аритмия, стеноз магистральных артерий головы и шеи, сахарный диабет и ишемическая болезнь сердца. Для ТИА наиболее значимыми факторами риска являются: возраст моложе 60 лет, наличие артериальной гипертензии и головокружения. Кроме того значительное влияние на возникновение ТИА оказывают следующие комбинации: артериальная гипертензия и ишемическая болезнь сердца, стеноз МАГ и ишемическая болезнь сердца, а также наличие стеноза МАГ, аритмии и ишемической болезни сердца одновременно.

Выявленные на российской выборке с использованием методов машинного обучения факторы риска и их комбинации коррелируют, по наиболее известным факторам риска, с результатами других исследований, выполненных в странах Европы, Азии и Африки. В то же время, полученные результаты продемонстрировали некоторые отличия, для подтверждения которых необходимы дальнейшие исследования на расширенной российской выборке.

Литература

1. Гусев А.В., Кузнецова Т.Ю., Корсаков И.Н. Искусственный интеллект в оценке рисков развития сердечно-сосудистых заболеваний // Журнал телемедицины и электронного здравоохранения. 2018. № 3. С. 85-90.
2. Кобринский Б.А., Кадыков А.С., Полтавская М.Г., Благосклонов Н.А., Ковелькова М.Н. Принципы функционирования интеллектуальной системы динамического контроля факторов риска и формирования рекомендаций по здоровьесбережению // Профилактическая медицина. 2019. Т.22. №5. С.78- 84.
3. Feigin V.L. et al. Global, regional, and national burden of stroke and its risk factors, 1990–2019: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019 // The Lancet Neurology. 2021. Vol. 20. №. 10. P. 795-820.
4. Johnson C.O. et al. Global, regional, and national burden of stroke, 1990–2016: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2016 // The Lancet Neurology. 2019. Vol. 18. №. 5. P. 439-458.
5. Boehme A.K., Esenwa Ch., Elkind M.S.V. Stroke Risk Factors, Genetics, and Prevention. Circulation Research. 2017. Vol. 120. P. 472–495.
6. Chen J. et al. Stroke Risk Factors of Stroke Patients in China: A Nationwide Community-Based Cross-Sectional Study // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022. Vol. 19. №. 8. P. 4807.
7. Швец Д.А., Поветкин С.В. Сравнительный обзор использования методов машинного обучения для прогнозирования сердечно-сосудистого риска // Вестник новых медицинских технологий. Электронное периодическое издание. 2020. № 5. С.74-82.
8. Lee S., Kim H.S. Prospect of artificial intelligence based on electronic medical record // Journal of Lipid and Atherosclerosis. 2021. Vol. 10. №. 3. P. 282.
9. Невзорова В.А., Плехова Н.Г., Присеко Л.Г., Черненко И.Н., Богданов Д.Ю., Мокишина М.В., Кулакова Н.В. Методы машинного обучения в прогнозировании исходов и рисков сердечно-сосудистых заболеваний у пациентов с артериальной гипертензией (по материалам ЭССЕ-РФ в Приморском крае) // Российский кардиологический журнал. 2020. № 3. С. 10-16.
10. Баранов А.А. и др. Технологии комплексного интеллектуального анализа клинических данных // Вестник Российской академии медицинских наук. 2016. Т. 71. №. 2. С. 160-171.
11. Tayefi M. et al. Challenges and opportunities beyond structured data in analysis of electronic health records // Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics. 2021. Vol. 13. №. 6. P. e1549.
12. Shelmanov A.O., Smirnov I.V., Vishneva E.A. Information extraction from clinical texts in Russian // Computational Linguistics and Intellectual Technologies: Papers from the Annual International Conference “Dialogue”. 2015. Vol. 1. P. 537-549.
13. Blinov P. et al. RuMedBench: A Russian Medical Language Understanding Benchmark // Artificial Intelligence in Medicine. AIME 2022. Lecture Notes in Computer Science. 2022. Vol. 13263. P. 383- 392.
14. Yalunin A., Nesterov A., Umerenkov D. RuBioRoBERTa: a pre-trained biomedical language model for Russian language biomedical text mining. 2022. URL: <https://arxiv.org/abs/2204.03951>.
15. Liu Y. et al. Roberta: A robustly optimized bert pretraining approach. 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1907.11692>.
16. Панов А.И. Выявление причинно-следственных связей в данных психологического тестирования логическими методами // Искусственный интеллект и принятие решений. 2013. №. 1. С. 24-32.

17. Чудова Н.В., Панов А.И. Извлечение причинно-следственных отношений из данных психологического исследования на материале изучения агрессивности // Искусственный интеллект и принятие решений. 2016. №. 4. С. 38- 46.
18. Самойлова Е.М., Юсубалиева Г.М., Белопасов В.В., Екушева Е.В., Баклаушев В.П. Инфекции и воспаление в развитии инсульта // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. Спецвыпуски. 2021. Т. 121. № 8. С.11- 21.
19. Донитова В. В. и др. Методы обработки естественного языка для извлечения факторов риска инсульта из медицинских текстов // Труды ИСА РАН. 2021. Т. 71. №. 4. С. 93.
20. Благосклонов Н.А., Донитова В.В., Киреев Д.А., Кобринский Б.А., Смирнов И.В. Лингвистический анализ историй болезни для выявления факторов риска инсульта // Труды ИСА РАН. 2020. Т. 70. № 3. С. 76- 86.
21. Nakayama H. Seqeval: A python framework for sequence labeling evaluation, Available at: <https://github.com/chakki-works/seqeval> (дата обращения 15.12.2022)
22. Du X., McNamee R., Cruickshank K. Stroke risk from multiple risk factors combined with hypertension: a primary care based case-control study in a defined population of northwest England // Annals of Epidemiology. 2000. Vol. 10. №. 6. P. 380-388.
23. Sebastian S., Stein L.K., Dhamoon M.S. Infection as a Stroke Trigger. Associations Between Different Organ System Infection Admissions and Stroke Subtypes // Stroke. 2019. Vol. 50. P. 2216 - 2218.
24. O'Donnell MJ, Chin SL, Rangarajan S, Xavier D, Liu L, Zhang H, et al. INTERSTROKE Investigators. Global and regional effects of potentially modifiable risk factors associated with acute stroke in 32 countries (INTERSTROKE): a case-control study // The Lancet. 2016. Vol. 388. №10046. P. 761-775.
25. Thiele I., Linseisen J., Heier M., Holle R., Kirchberger I., Peters A. et al. Time trends in stroke incidence and in prevalence of risk factors in Southern Germany, 1989 to 2008/09 // Scientific Reports. 2018. Vol. 8. №1. P. 1-8.
26. Murakami K., Asayama K., Satoh M., Inoue R., Tsubota-Utsugi M. et al. Miki Hosaka Risk Factors for Stroke among Young-Old and Old-Old Community-Dwelling Adults in Japan: The Ohasama Study // Journal of atherosclerosis and thrombosis. 2017. Vol. 24. P. 290-300.
27. Усанова Т.А. и др. Факторы риска ишемического инсульта // Современные проблемы науки и образования. 2020. №. 2. С. 133.

Донитова Виктория Владимировна. Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук» г. Москва, Россия. Научный сотрудник. Количество печатных работ: 20. Область научных интересов: извлечение знаний, интеллектуальные системы, системы поддержки принятия решений, экспертные системы. E-mail: vdonitova@gmail.com (Ответственный за переписку).

Киреев Данил Алексеевич. Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук» г. Москва, Россия. Программист. Количество печатных работ: 5. Область научных интересов: машинное обучение, глубокое обучение, активное обучение, обработка естественного языка, извлечение именованных сущностей. E-mail: kireev@isa.ru

Кобринский Борис Аркадьевич. Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и Управление» Российской Академии Наук», г. Москва, Россия. Заведующий отделом. Доктор медицинских наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ. Количество печатных работ: более 500 (в т.ч. 15 монографий и учебников). Область научных интересов: инженерия знаний, нечеткая логика, экспертные системы, интеллектуальные системы, системы поддержки принятия решений. E-mail: kba_05@mail.ru

Смирнов Иван Валентинович. Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и Управление» Российской Академии Наук», г. Москва, Россия. Заведующий отделом. Кандидат физико-математических наук, доцент. Количество печатных работ: 123. Область научных интересов: интеллектуальный анализ текстов и данных, обработка естественного языка. E-mail: ivs@isa.ru

Титова Елизавета Викторовна. Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук» г. Москва, Россия. Инженер-исследователь. Количество печатных работ: 5. Область научных интересов: обработка естественного языка, проблемно-ориентированные системы, экспертные системы, медицинские информационные системы. E-mail: elz.titova@gmail.com

Retrieving stroke risk factors based on intellectual analysis of electronic health records

V.V. Donitova, D.A. Kireev, B.A. Kobrinskii, I.V. Smirnov, E.V. Titova
Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. Stroke is the world’s second leading cause of death and the third leading cause of disability and death combined. Risk factors for stroke are potentially manageable so prevention of this disease is possible. Identification of previously unknown modifiable risk factors for stroke or testing the significance of known factors is an urgent task that should be solved based on a retrospective analysis of the electronic health records of patients with this disease. The paper presents an approach to identifying risk factors for acute cerebrovascular accidents from texts of case histories using natural language processing and machine learning methods. The proposed approach made it possible to identify risk factors for stroke and transient ischemic attack in patients of one of the Moscow clinics. The identified factors are consistent with those found in other studies.

Keywords: *risk factors, stroke, information extraction from texts, machine learning, electronic health records*

DOI: 10.14357/20790279230211

References

1. Gusev A.V., Kuznetsova T.Yu., Korsakov I.N. 2018. Iskusstvennyi intellekt v otsenke riskov razvitiya serdechno-sosudistyykh zabolevaniy [Artificial intelligence in assessing the risks of developing cardiovascular diseases]. Zhurnal teleditsiny i elektronnoy zdravookhraneniya [Journal of Telemedicine and eHealth]. 3: 85-90.
2. Kobrinskii B.A., Kadykov A.S., Poltavskaya M.G., Blagosklonov N.A., Kovelkova M.N. 2019. Printsipy funktsionirovaniya intellektualnoi sistemy dinamicheskogo kontrolya faktorov riska i formirovaniya rekomendatsii po zdorovesberezeniyu [Principles of functioning of an intelligent system for dynamic control of risk factors and the formation of recommendations for health saving]. Profilakticheskaya meditsina [Preventive medicine]. 22 (5): 78- 84. doi: 10.17116/profmed20192205178.
3. Feigin V.L. et al. 2021. Global, regional, and national burden of stroke and its risk factors, 1990–2019: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. The Lancet Neurology. 20 (10): 795-820.
4. Johnson C.O. et al. 2019. Global, regional, and national burden of stroke, 1990–2016: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2016. The Lancet Neurology. 18 (5): 439-458.
5. Boehme A.K., Esenwa Ch., Elkind M.S.V. 2017. Stroke Risk Factors, Genetics, and Prevention. Circulation Research. 120: 472–495. doi: 10.1161/CIRCRESAHA.116.308398.
6. Chen J. et al. 2022. Stroke Risk Factors of Stroke Patients in China: A Nationwide Community-Based Cross-Sectional Study. International Journal of Environmental Research and Public Health. 19 (8): 4807.
7. Shvets D.A., Povetkin S.V. 2020. Sravnitelnyi obzor ispolzovaniya metodov mashinnogo obucheniya dlya prognozirovaniya serdechno-sosudistogo riska [Comparative review of the use of machine learning methods for predicting cardiovascular risk]. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologii. Elektronnoe periodicheskoe izdanie [Bulletin of new medical technologies. Electronic periodical.]. 5: 74-82. doi: 10.24411/2075-4094-2020-16711.
8. Lee S., Kim H.S. 2021. Prospect of artificial intelligence based on electronic medical record. Journal of Lipid and Atherosclerosis. 10 (3): 282.
9. Nevzorova V.A., Plekhova N.G., Priseko L.G., Chernenko I.N., Bogdanov D.Yu., Mokshina M.V., Kulakova N.V. 2020. Metody mashinnogo obucheniya v prognozirovanii iskhodov i riskov serdechno-sosudistyykh zabolevaniy u patsientov s arterialnoi gipertenziei (po materialam ESSE-RF v Primorskom krae) [Machine learning methods in predicting the outcomes and risks of cardiovascular diseases in patients with arterial hypertension (based on ESSE-RF materials in Primorsky Krai)]. Rossiiskii kardiologicheskii zhurnal [Russian Journal of Cardiology]. 3: 10-16. doi: 10.15829/1560-4071-2020-3-3751.

10. *Baranov A.A. et al.* 2016. Tekhnologii kompleksnogo intellektualnogo analiza klinicheskikh dannykh [Technologies of complex intellectual analysis of clinical data]. Vestnik Rossiiskoi akademii meditsinskikh nauk [Bulletin of the Russian Academy of Medical Sciences]. 71 (2): 160-171.
11. *Tayefi M. et al.* 2021. Challenges and opportunities beyond structured data in analysis of electronic health records. Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics. 13 (6): e1549.
12. *Shelmanov A.O., Smirnov I.V., Vishneva E.A.* 2015. Information extraction from clinical texts in Russian. Computational Linguistics and Intellectual Technologies: Papers from the Annual International Conference "Dialogue". 1: 537-549.
13. *Blinov P. et al.* 2022. RuMedBench: A Russian Medical Language Understanding Benchmark. Artificial Intelligence in Medicine. AIME 2022. Lecture Notes in Computer Science. 13263: 383-392.
14. *Yalunin A., Nesterov A., Umerenkov D.* RuBioRoBERTa: a pre-trained biomedical language model for Russian language biomedical text mining. 2022. URL: <https://arxiv.org/abs/2204.03951>.
15. *Liu Y. et al.* Roberta: A robustly optimized bert pretraining approach. 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1907.11692>.
16. *Panov A.I.* 2013. Vyyavlenie prichinno-sledstvennykh svyazei v dannykh psikhologicheskogo testirovaniya logicheskimi metodami [Identification of causal relationships in psychological testing data by logical methods]. Iskusstvennyi intellekt i prinyatie reshenii [Artificial intelligence and decision making]. 1: 24-32.
17. *Chudova N.V., Panov A.I.* 2016. Izvlechenie prichinno-sledstvennykh otnoshenii iz dannykh psikhologicheskogo issledovaniya na materiale izucheniya agressivnosti [Extraction of causal relationships from the data of psychological research on the material of the study of aggressiveness]. Iskusstvennyi intellekt i prinyatie reshenii [Artificial intelligence and decision making]. 4: 38-46.
18. *Samoilova E.M., Yusubalieva G.M., Belopasov V.V., Ekusheva E.V., Baklaushev V.P.* 2021. Infektsii i vospalenie v razvitiі insulta [Infection and inflammation in the development of stroke]. Zhurnal nevrologii i psikiatrii im. S.S. Korsakova. Spetsvy-puski [Journal of Neurology and Psychiatry. S. S. Korsakov. Special editions]. 121 (8): 11-21.
19. *Donitova V.V. et al.* 2021. Metody obrabotki estestvennogo yazyka dlya izvlecheniya faktorov riska insulta iz meditsinskikh tekstov [Natural language processing models for extraction of stroke risk factors from electronic health records]. Trudy Instituta sistemnogo analiza rossiyskoy akademii nauk [Proceedings of the Institute for Systems Analysis of the Russian Academy of Science]. 71 (4): 93.
20. *Blagosklonov N.A. et al.* 2020. Lingvisticheskii analiz istorii bolezni dlya vyyavleniya faktorov riska insulta [Linguistic analysis of disease history for identifying stroke risk factors]. Trudy Instituta sistemnogo analiza rossiyskoy akademii nauk [Proceedings of the Institute for Systems Analysis of the Russian Academy of Science]. 70 (3): 75-85.
21. *Nakayama H.* Seqeval: A python framework for sequence labeling evaluation, Available at: <https://github.com/chakki-works/seqeval> (дата обращения 15.12.2022)
22. *Du X., McNamee R., Cruickshank K.* 2000 Stroke risk from multiple risk factors combined with hypertension: a primary care based case-control study in a defined population of northwest England. Annals of Epidemiology. 10 (6): 380-388
23. *Sebastian S., Stein L.K., Dhamoon M.S.* 2019 Infection as a Stroke Trigger. Associations Between Different Organ System Infection Admissions and Stroke Subtypes. Stroke. 50: 2216 - 2218. doi: 10.1161/STROKEAHA.119.025872
24. *O'Donnell MJ, Chin SL, Rangarajan S, Xavier D, Liu L, Zhang H, et al.* 2016. INTERSTROKE Investigators. Global and regional effects of potentially modifiable risk factors associated with acute stroke in 32 countries (INTERSTROKE): a case-control study. The Lancet. 388 (10046): 761 - 775. doi: 10.1016/S0140-6736(16)30506-2
25. *Thiele I., Linseisen J., Heier M., Holle R., Kirchberger I., Peters A. et al.* 2018 Time trends in stroke incidence and in prevalence of risk factors in Southern Germany, 1989 to 2008/09. Scientific Reports. 8 (1): 1-8. doi: 10.1038/s41598-018-30350-8
26. *Murakami K., Asayama K., Satoh M., Inoue R., Tsubota-Utsugi M. et al.* 2017 Miki Hosaka Risk Factors for Stroke among Young-Old and Old-Old Community-Dwelling Adults in Japan: The Ohasama Study. Journal of atherosclerosis and thrombosis. 24: 290-300. doi: 10.5551/jat.35766
27. *Usanova T.A. et al.* 2020. Faktory riska ishemicheskogo insulta [Risk factors for ischemic stroke]. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya [Modern problems of science and education]. 2: 133.

Donitova V.V. Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. E-mail: vdonitova@gmail.com

Kireev D.A. Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. E-mail: kireev@isa.ru

Kobrinskii B.A. PhD, Professor. Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. E-mail: kba_05@mail.ru

Smirnov I.V. PhD, Assoc. Professor. Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. E-mail: ivs@isa.ru

Titova E.V. Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, 44/2 Vavilova str., Moscow, Russia. E-mail: elz.titova@gmail.com

Управление рисками и безопасностью

Deception-решения в системе экономической безопасности банка

Г.В. Федотова^I, Ю.А. Капустина^{II}, Р.Х. Ильясов^{III}, Цицигэ^{IV}

^I Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», г. Москва, Россия

^{II} Уральский государственный лесотехнический университет, г. Екатеринбург, Россия

^{III} Чеченский государственный университет им. А.А. Кадырова, г. Грозный, Россия

^{IV} Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, г. Москва, Россия

Аннотация. Работа посвящена обзору современных тенденций развития банковского онлайн-обслуживания клиентов с применением технологий дистанционного обслуживания. Усложнение банковских цифровых платформ привело к формированию информационных экосистем, позволяющих удовлетворять самые различные потребности клиентов. На примере экосистемы СБЕР показано, что сегодня банки не просто управляют счетами клиентов, но и интегрируются с маркетплейсами для оказания различных нефинансовых услуг. Процесс накопления колоссальных массивов персональной и конфиденциальной информации, финансовых активов привлекает интерес мошенников, работающих в сети Интернет. Статистика киберкраж и несанкционированных доступов в цифровые сервисы доказывает, что кибермошенничество постоянно расширяется и ищет новые инструменты для взломов систем. Поэтому цель работы заключается в обосновании нового подхода к выстраиванию защиты на основе детектирования кибератак – deception. Поставленная цель обусловила решение следующей задачи: рассмотрены общие тенденции усложнения банковских цифровых платформ до целых экосистем, изучена статистика кибермошенничества в сети Интернет и особенности проведения целевых кибератак, предложен новый подход к выстраиванию системы защиты цифровых сервисов банков.

Ключевые слова: безопасность, интернет-банкинг, персональные данные, кибермошенничество, кражи.

DOI: 10.14357/20790279230212

Введение

Интернет-банкинг сегодня достаточно повседневная услуга, которая набирает из года в год все большее количество пользователей. Огромные возможности для экономии времени и издержек для кредитных учреждений будут способствовать расширению и дальнейшему усложнению услуг, оказываемых

средством Интернета. Повсеместно доказано, что финансовый сектор выступает лидером и катализатором последующей глобализации и цифровизации всей социально-экономической системы. Развивая онлайн-сервис финансовых услуг, государство способствует росту финансовой и информационной грамотности населения. Ежедневное или периоди-

ческое использование Интернета в осуществлении текущих платежей повышает доверие граждан к системам дистанционного доступа к своим счетам [1].

Современный коммерческий банк – это больше виртуальный мультибанк, который контактирует с клиентами через Интернет, что дает возможность построить финансовую систему информационной экономики, а в некоторых случаях отдельную экосистему. Кредитные организации постоянно расширяют свои возможности в онлайн-пространстве – предлагают новые сервисы, оформление документов без посещения офиса, проводят огромные объемы электронных платежей и транзакций ежедневно [2]. Сегодня банки ищут новые точки роста и рыночные ниши, в том числе посредством перевода основных операций бизнеса в онлайн-пространство. И как новое веяние 2022 года – интеграция и расширение сотрудничества банков с маркетплейсами. (рис. 1).

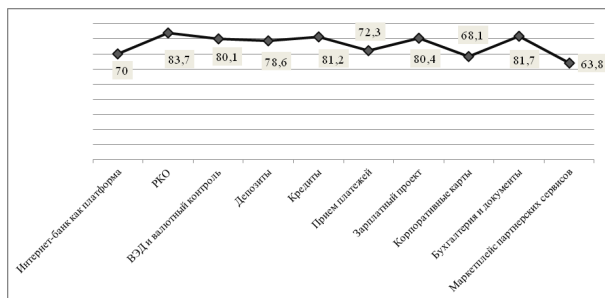


Рис. 1. Объемы банковских операций по итогам 2022 года, %.

Источник: составлено авторами по материалам [3]

По данным рис. 1 видим, что максимальный объем операций приходился на кредиты и зарплатные проекты от 81,2 до 80,4% соответственно. Объемы банковских услуг по интернет-банкингу достигли 70%, по обслуживанию маркетплейсов – 63,8%. Фактически эти доли рынка еще не достигли своего насыщения и имеют хороший потенциал к росту.

Расширение Интернета и переход целых секторов бизнеса в онлайн-пространство формируют прочную платформу для перевода и обслуживания финансовых потоков в цифровом виде. Поэтому вопросы обеспечения максимальной безопасности операций и сохранности информации, счетов клиентов представляют собой задачу первостепенной важности в системах безопасности кредитных организаций.

1. Результаты и обсуждения

Современный мир – мир цифровых и компьютерных технологий, посредством которых многие

пользователи все чаще совершают финансовые операции через системы интернет-банкинга [4, 5]. Клиенты сегодня хотят от банка не только получать финансовые услуги и обслуживание счетов, но и другие нефинансовые услуги по самым различным вопросам. Банки готовы их предоставлять, поэтому они формируют целые экосистемы. Наиболее ярким примером выступает Сбербанк, который официально в сентябре 2020 года провел ребрендинг и приобрел новый фирменный знак СБЕР (рис. 2).

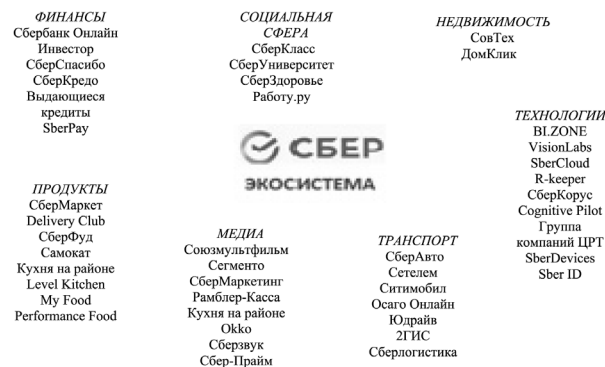


Рис. 2. Пример Digital-трансформации Сбербанка в экосистему СБЕР в 2022 году.

Источник: составлено авторами по материалам [3]

Произошедшие изменения в спектре банковских услуг Сбербанка – это следование современным требованиям клиентов, которые предъявляют новые запросы к банковскому обслуживанию [6, 7, 8]. Принципы работы современного банка строятся по вектору «скорость-качество-удобство», при этом усилившаяся конкуренция между банковскими и небанковскими организациями приводит к расширению перечня нефинансовых услуг банков. С целью сохранения клиентской базы банки выходят за пределы своих финансовых полномочий и формируют целые вселенные (экосистемы) по обслуживанию клиентов по самым разным вопросам. Лидерами в этой сфере выступают Сбербанк, Тинькофф, ВТБ и Газпром, которые предлагают максимально широкую линейку продуктов и услуг, при этом некоторые сервисы выделяются в отдельные подразделения банков.

Широкая линейка предоставляемых услуг, максимально привязывает клиента к банку, что экономит его время и усиливает лояльность к банку. Каждый клиент в банке становится персонализирован, к нему применяется индивидуальный подход и отслеживаются его действия в онлайн-системе [9, 10]. С этой целью сформированы цифровые фабрики данных, в которых аккумулируется полная информация по клиенту (его поисковые за-

просы, геолокация, время поиска, активность в сетях) и формируется его профиль, в соответствии с которым будут предложены определенные услуги и продукты как финансовые, так и нефинансовые. На основе массива данных работают фабрики продуктов и предложений от банка. При этом все поиски сопровождаются чат-ботами и виртуальными помощниками (рис. 3).



Рис. 3. Элементы цифровой платформы СБЕР.
Источник: составлено авторами по материалам [3,11]

Цифровые платформы на примере Сбербанка представляют собой целые фабрики по хранению данных, последующей их обработкой и формированием новых фабрик предложений услуг и продуктов для клиентов с учетом их потребностей. Банки стали позиционировать себя в тесном взаимодействии с IT-технологиями, стали уделять внимание клиентскому опыту, формировать индивидуальные цифровые портреты клиентов. Поэтому рост популярности онлайн-сервисов растет с каждым годом, но с ростом их популярности растет уровень банковского мошенничества, которое перешло в онлайн-среду. Сегодня основной проблемой банков является обеспечение безопасности финансовых операций, совершаемых клиентами дистанционно, а также сохранение персональной информации и данных клиентов.

Появился и развивается на протяжении длительного периода новый вид мошенничества – киберпреступность, то есть преступления в цифровом пространстве [12, 13]. Как правило, объектами кибератак становятся в первую очередь интернет-сайты кредитных организаций, интернет-магазинов, платежных операторов, то есть цифровые хранилища денег и ценных активов юридических и физических лиц. В 2022 году увеличилось количество атак на приложения с пакетом Microsoft Office, наиболее популярным в России. Но, помимо данных целевых атак на офис, другие приложения тоже подвергаются регулярным массированным атакам. (рис. 4).

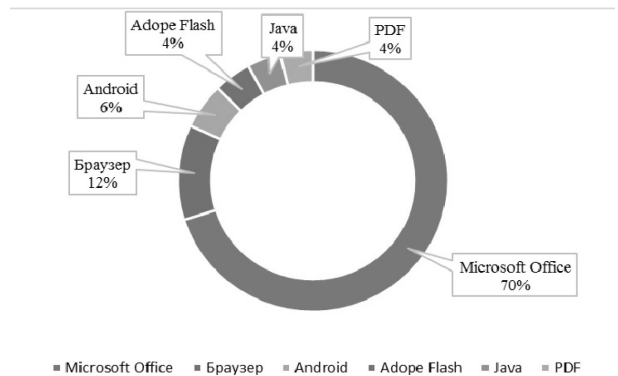


Рис. 4. Статистика распределения кибератак по эксплойтам в 2022 году.
Источник: составлено авторами по материалам [14,20]

Согласно представленной статистике основными целями атак в 2022 году стали офисные приложения, браузеры и приложения для Android. Все перечисленные эксплойты используются банками для предоставления финансовых и нефинансовых услуг через свои цифровые платформы. Из года в год количество новых вредоносных программ растет и появляются новые методы и технологии взломов онлайн-сервисов банков и клиентских счетов. Теневая экономика сформировала новый сектор Интернета – Dark Net, в котором работают хакеры и создают свои продукты для реализации мошенничества и дестабилизации работы легальных цифровых систем. [15–17].

Статистика 2022 года показала с какой эффективностью и производительностью могут работать хакеры. Согласно отчетным данным Лаборатории Касперского 2022 год можно назвать рекордным по количеству атак и новых вредоносных программ. В 2022 году по сравнению с 2021 годом наблюдался рост ежедневных обнаруженных атак на 5%, при этом количество вирусных файлов достигало 400000 штук ежедневно. Кроме того, целевые атаки проводились под видом файлов Microsoft Office, которые фактически блокировали работу сервисов, систем, цифровых платформ. Цифры производительности сектора DarkNet свидетельствуют о масштабном и целенаправленном финансировании хакерства в сети Интернет (рис. 5).

Несмотря на впечатляющие цифры кибератак платформы продолжали работать в 2022 году. Банковское обслуживание проводилось фактически без перебоев, банки максимально быстро адаптировались к смене вендоров (после ухода иностранных компаний), к замене платежных систем, выдерживали массированные атаки хакеров и оперативно устранили свои уязвимости.

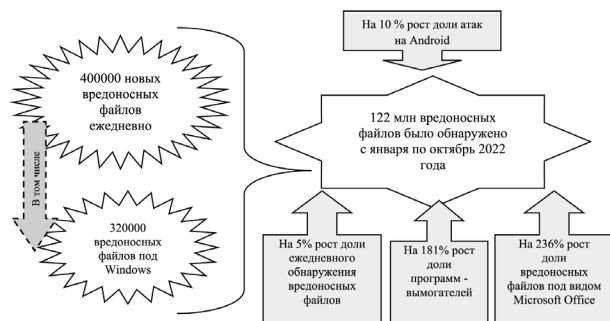


Рис. 5. Статистика ежедневных атак файлами-вирусами в 2022 году.

Источник: составлено авторами по материалам [18–20]

В 2023 году интернет-банкинг продолжит свое развитие и появятся следующие направления:

- система быстрых платежей (СБП);
- банки создают и углубляют свои цифровые платформы, выстраивая целые экосистемы на их основе;
- усложняется работа банков с Big Data с помощью которой формируется сегментированный оффер для клиентов;
- онлайн-финансовое планирование бюджетов клиентов;
- полная цифровизация данных, архивов и досье по клиентам;
- полный переход на безбумажный документооборот и применение электронной цифровой подписи;
- развитие корпоративных IoT на основе умных устройств от банков (ТВ-приставка SberBox, смарт-дисплей SberPortal);
- ESG-банкинг – концепция банковской деятельности, в основе которой лежит экологическая, социальная и корпоративная ответственность [3, 19, 21].

Банки всегда будут в центре внимания хакеров, так как атаки на банковский сектор имеют мошеннический характер, поскольку важным для злоумышленников является не информация, а средства на счетах клиентов. Можно заметить, что атаки на цифровые системы банков носят целевой таргетированный характер.

Целевые атаки готовятся определенное время, направлены на результативность (кражу), под них специально разрабатывается вредоносная программа с учетом штатных средств защиты. К сожалению, результативность подобных атак достаточно высокая, что обеспечивает достижение поставленной цели. Для лучшего понимания природы целевой атаки предлагаем изучить ее основные фазы (рис. 6).

Фактически целевые атаки АРТ (Advanced Persistent Threat) очень сложно предотвратить, так как хакеры действуют осторожно, хорошо

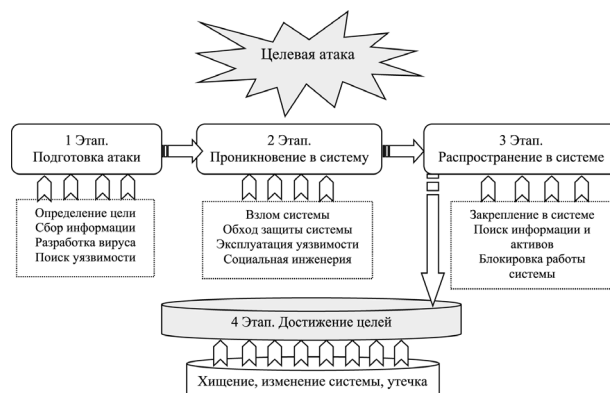


Рис. 6. Основные этапы реализации целевых кибератак на банки.

Источник: составлено авторами по материалам [20,22]

маскируются и постоянно совершенствуют свой инструментарий и методику. Все существующие средства защиты сервисов от целевых атак в основном строятся на идентификации и детектировании известных атак. При появлении новых видов вредоносных файлов система не всегда может работать на нее как на вирус. В этом заключается основная проблема всех систем обеспечения безопасности – они работают постфактум, после реализации атаки и перевода ее в массовый характер. Неизбежны при таком подходе ошибки системы защиты 1 и 2 уровней, что приводит к успеху целевых атак. Злоумышленники пользуются тем фактом, что не всегда система защиты реагирует однозначно на появление аномалии как на целевую атаку и поэтому не реагирует на нее. В такой ситуации необходимо усиливать работу по детектированию аномалий и однозначной идентификации их как атаки, после чего будет срабатывать система защиты согласно утвержденному протоколу.

Атаки АРТ требуют комплексного подхода к выстраиванию системы защиты цифровых платформ. Ежедневное обновление пакета вредоносных программ, атакующих сервисы, впечатляет своей масштабностью и заставляют искать новые специализированные решения по их предотвращению [22]. С усложнением цифровых платформ кредитных организаций должна модернизироваться и система безопасности, которая не просто должна блокировать работу всего сервиса, но и быстро уничтожать вирусы и вредоносные файлы. Высокие требования клиентов к скорости и бесперебойности совершений операций в онлайн-среде в режиме 24/7 наряду с растущей конкуренцией между финансовыми организациями исключают полную блокировку работы платформы. Поэто-



Рис. 7. Элементы системы безопасности (СБ) коммерческого банка.

Источник: составлено авторами по материалам [23,24]

му необходимы решения, которые автоматически будут отражать атаки, не нарушая темпов работы экосистемы и ее качества. Рассмотрим основные ключевые элементы выстраивания системы безопасности (рис. 7).

2. Deception-решения

Представленные элементы СБ необходимо постоянно модернизировать, буквально ежедневно, так как появление каждый день тысячи новых вредоносных программных обеспечений не оставляют вариантов для статичной работы. Поэтому новые решения для обеспечения безопасности продолжают появляться.

Одним из примеров нового подхода к выстраиванию защиты цифровой платформы выступают – Deception-ловушки, обеспечивающие обнаружение в режиме реального времени атаки АРТ, реальную защиту ценных активов за счет переключения целей хакеров на фейковые сайты и ложные активы, исключение ложных срабатываний и т.п. Помимо прочего в процессе детектирования атак данная технология также собирает и генерирует информацию о мошенниках – составляет их профиль, проводит анализ применяемых методов и инструментов, составляет хронологию взлома, определяет источники происхождения хакеров по IP-адресам и данным DNS [24, 25].

Представим схематично алгоритм работы Deception в системе безопасности коммерческого банка. Как видим из рис. 8 фактически сеть Deception DDP создает внутри системы имитационную модель функционирования настоящих сервисов и узлов для отвлечения внимания злоумышленников. Сеть-ловушка работает во всей системе, зациклена на каждый входящий узел из внешней среды Интернет. С нашей точки зрения, необходимо таким образом настраивать DDP, чтобы любой входящий сигнал извне поступал сначала в сеть-ло-

вушку, где автоматически идентифицировался и детектировался, а затем по результатам оценки либо блокировался, либо дальше перенаправлялся в реальную сеть [26–28]. При этом на выходе из имитационной сети должна стоять штатная система антивирусного программного обеспечения, то есть будет осуществляться система двухуровневого контроля входных запросов: 1 уровень – детектирование входящих запросов, 2 уровень – антивирусная защита и оценка. Затем запросы поступают в реальную сеть (экосистему), где обрабатываются и направляются ответные запросы, оказываются финансовые услуги клиентам. В узле «Защита» не просто проходит штатная проверка на антивирусные уязвимости, но и должна генерироваться оперативная информация по новым обнаруженным вредоносным входящим запросам и файлам.

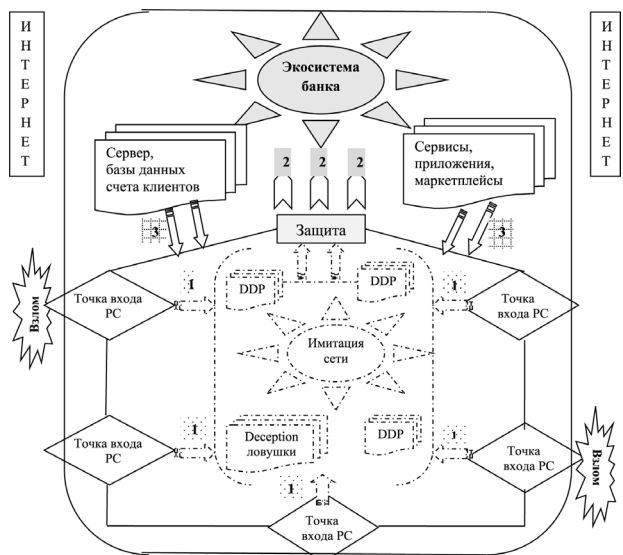


Рис. 8. Цифровая банковская сеть с раскинутой системой защиты Deception DDP (Distributed Deception Platform).

Источник: составлено авторами

В зависимости от скорости передачи накопленной информации по всей сети и ее применении будет зависеть эффективность всей системы защиты цифровой платформы. Очень важно, чтобы выстроенная система информационной безопасности банка быстро обменивалась информацией и быстро самообучалась. Только в таком случае система экономической безопасности будет результативно противостоять кибератакам и мошенническим провокациям. В данной ситуации очень перспективно выстраивать саму имитационную сеть на основе нейросетей, которые динамично трансформируются в процессе применения и быстро самообучаются [29, 30].

Технологии и решения Desception сегодня сравнительно новые и продолжают развиваться в соответствии с запросами клиентов. Отметим, что это решение не заменяет существующих стандартных систем антивирусного поиска, а только дополняет их новым подходом к обнаружению несанкционированных входов, взломов, целевых кибератак. Основная ценность данной технологии – это возможность обнаружить целевые атаки на систему, которые штатные ПО не в состоянии идентифицировать. Кроме того, при прохождении такой хакерской атаки через сеть DDP считывается сам профиль взломщика и его местоположение через IP-адрес компьютера. Основная задача сводится в правильной ее настройке и механизмах ее применения. Это превентивный подход к выстраиванию защиты, при котором на моменте входа отражаются хакерские атаки, что снижает их результативность и эффективность, сокращает долю несанкционированных операций со счетами клиентов и в итоге подрывает финансовую основу DarkNet.

Заключение

Резюмируя наше исследование, отметим, что проблемы обеспечения экономической безопасности в цифровой экономике трансформируются в проблему кибербезопасности, так как успех мошенников будет зависеть прежде всего от их технической возможности взломать систему. Поэтому сегодня в эпоху Digital системы защиты платежных и финансовых сервисов банков зависят от качества команды IT-специалистов. Кибератаки будут продолжаться и их методы будут модернизироваться, так как DarkNet – это цифровой теневой сектор со своими инвесторами и заказчиками, которые готовы финансировать нелегальные пути вывода денежных средств и ценной информации. Эксперты по безопасности банков должны тщательно детектировать и анализировать информацию, поступающую вместе с вредоносными ПО, чтобы формировать и выстраивать эффективную систему экономической безопасности.

Литература

1. *Melnik A., Ermolaev K., Kuzmin M.* Mechanism for Adjustment of the Companies Innovative Activity Control Indicators to Their Strategic Development Goals Global // *Journal of Flexible Systems Management*. 2019, № 20(4). P. 189-218. DOI:10.1007/s40171-019-00210-z.
2. *Sushil P.* Managing Lifetime Wastivity // *Global Journal of Flexible Systems Management*. 2018, № 19(3). P. 187-189. DOI:10.1007/s40171-018-0194-8.
3. Аналитический отчет «Business Internet Banking Rank 2022». Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.marksw Webb.ru/report/business-internet-banking-rank-2022/#anchor-about>.
4. *Burbach D.T. Watts C.* Messing with the Enemy: Surviving in a Social Media World of Hackers, Terrorists, Russians, and Fake News // *Naval War College Review*. 2020, Vol. 73: No. 1, Article 17. Available at: <https://digital-commons.usnwc.edu/nwc-review/vol73/iss1/17>.
5. Global trends of the digital economy development / A. V. Kolesnikov, L. E. Zernova, V. V. Degtyareva Yu. I. Sigidov // *Opcion*. 2020. Vol. 36. No S26. P. 523-540.
6. *Федотова Г.В., Куразова Д.А.* Угрозы кибербезопасности устойчивости цифровых платформ // В сборнике: ВТ-технологии и корпоративные информационные системы в оптимизации бизнес-процессов цифровой экономики. Материалы IX Международной научно-практической очно-заочной конференции. Отв. за выпуск: А.Ю. Коковихин, Н.М. Сурнина, отв. редактор В.В. Городничев. Екатеринбург. 2022. С. 118-120.
7. *Буряк В.В.* Хакеры, хактивизм и проблема обеспечения кибербезопасности в условиях цифровой экономики / В.В. Буряк // *Бенефициар*. Кемерово, 2018. С.12-18. Режим доступа: <http://beneficiari.dp.ru/wp-content/uploads/v27.pdf>
8. *Буряк В.В.* Цифровая экономика, хактивизм и кибербезопасность: Монография / В. В. Буряк. Симферополь: ИП Зуева Т.В. 2019. 140 с.
9. *Клочкова Е. Н., Леднева О. В.* Оценка эффективности развития информационного общества в России и некоторых странах мира. Режим доступа: <http://emag.iis.ru/arc/infosoc/emag.nsf/BPA/f73457f75b45591b44257d63004afb9> (дата обращения: 15.01.2023).
10. *Бухт Р., Хикс Р.* Определение, концепция и измерение цифровой экономики // *Вестник международных организаций*. Т. 13. № 2. С. 143–172. DOI: 10.17323/1996.
11. *Гудкова О.В.* Риски и угрозы экономической безопасности России в условиях цифровизации экономики // *Известия высших учебных заведений. Серия «Экономика, финансы и управление производством»* [Ивэкофин]. 2022. № 01(51). С.73-80. DOI: 10.6060/ivecofin.2022511.587.
12. *Ермакова Л.В., Гудкова О.В., Дворецкая Ю.А.* Инновационные технологии на рынке банковских услуг. Бюллетень науки и практи-

- ки. 2018. Т. 4. № 5. С. 424-429. DOI:10.5281/zenodo.1246290.
13. *Силаева В.В., Назарова О.Г.* Система управления рисками в таможенной деятельности как направление обеспечения национальной безопасности в сфере внешней торговли. Финансовая жизнь. 2021. № 2. С. 28-31.
14. *Махутов Н.А.* Безопасность и риски: системные исследования и разработки / Н.А. Махутов. Новосибирск: Наука. 2017. 724 с.
15. *Елисеев А.В., Кузнецов Н.К., Миронов А.С.* Системный подход в оценке динамических состояний технических объектов на основе методов структурного математического моделирования // Труды ИСА РАН. 2022. Том 72. Вып.1. С. 93-104. DOI: 10.14357/20790279220109.
16. *Лившиц В.Н., Шаталова О.М., Дмитриева О.В.* Управляемая экономика: актуальные вопросы государственного управления в условиях цифровой трансформации // Труды ИСА РАН. 2021. Том 71. Вып.4. С. 11-22. DOI: 10.14357/20790279210402
17. *Моденов А.К., Власов М.П.* Особенности экономической безопасности в цифровой экономике // Петербургский экономический журнал. 2020. №2. С. 121-134.
18. *Федотова Г.В., Орлова Е.Р., Бочарова И.Е.* Вопросы кибербезопасности цифровых финансовых сервисов // Информационные технологии и вычислительные системы. 2022. №2. С. 37-45. DOI 10.14357/20718632220205
19. *Капустина Ю. А., Ильясов Р. Х., Цицигэ.* Экономика хактивизма – новый вектор развития теневого бизнеса // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Экономика. Социология. Менеджмент. 2022. 12(5). С. 56-67.
20. Аналитические отчеты об угрозах и уязвимостях АСУ ТП на портале Kaspersky Threat Intelligence. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://ics-cert.kaspersky.ru/services/>
21. Тренды digital-трансформации банков 2021–2024. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://vc.ru/future/338072-trendy-digital-transformacii-bankov-2021-2024>.
22. 2022-й стал «антирекордным» по количеству вирусов для ПК. Электронный ресурс. Режим доступа: https://4pda.to/2022/12/06/407105/2022_j_stal_antirekordnym_po_kolichestvu_virusov_dlya_pk/
23. Цифровая повестка Евразийского экономического союза до 2025 года: перспективы и рекомендации Обзор. URL: <http://documents.vsemirnyjbank.org/curated/ru/413921522436739705/pdf/EAEU-Overview-Full-RUS-Final.pdf>
24. *Жиленков А.А., Черный С.Г.* Извлечение информации из BigData с помощью нейросетевых архитектур как сетей ассоциаций информационных гранул // Труды ИСА РАН. 2022. Том 72. Вып. 3. С. 81-90. DOI: 10.14357/20790279220308
25. *George B., Sahar V., Samir D., Grigoris A.* Supply Chain Risk Management and Artificial Intelligence: State of the Art and Future Research Directions // International Journal of Production Research. 2018, № 7. P. 2179-2202. DOI:10.1080/00207543.2018.1530476.
26. *Сиротюк В.О.* Методы построения и анализа онтологической модели и эталонной базы данных цифрового фонда интеллектуальной собственности // Информационные технологии и вычислительные системы. 2022. №3. С. 58-66. DOI 10.14357/20718632220306
27. *Швецов А.Н.* Новейшие информационные технологии «цифровизации экономики»: содержание, перспективы, затраты // Труды ИСА РАН. 2021. Том 71. Вып. 1. С. 27-35.
28. *Jankowicz D.* Limits to Knowledge Transfer: What They Already Know in the Post-Command Economies // Journal of East-West Business. 2001, № 7(2). P. 37-59. DOI:10.1300/J097v07n02_03.
29. *Clarence W. de Silva.* Vibration. Fundamentals and Practice. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.: CRC Press. 2000. 957 p.
30. *Tapscott, D.* The Digital Economy: Promise and Peril In The Age of Networked Intelligence, McGrawHill. 1995. 342 p.

Федотова Гилия Васильевна. Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», г. Москва, Россия. Ведущий научный сотрудник. Доктор экономических наук, доцент. Количество печатных работ: более 400 (в т.ч. 20 монографий). Область научных интересов: управление социально-экономическими процессами, региональная экономика, экономика АПК. E-mail: g_evgeeva@mail.ru (ответственный за переписку)

Капустина Юлия Александровна. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет», г. Екатеринбург, Россия. Директор Социально-экономического института. Кандидат экономических наук, доцент. Количество печатных работ: более 50 (в т.ч. 5 монографий). Область научных интересов: экономическая безопасность, управленческий учет, региональная и отраслевая экономика. E-mail: kapustina_bu@mail.ru

Ильясов Руслан Хизраилевич. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Чеченский государственный университет им. А.А. Кадырова», г. Грозный, Россия. Заведующий кафедрой. Кандидат экономических наук, доцент. Количество печатных работ: более 80 (в т.ч. 5 монографий). Область научных интересов: экономическая безопасность, кибербезопасность, цифровая экономика, математические методы в экономике. E-mail: ilyasov_95@mail.ru

Цицигэ. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова», г. Москва, Россия. Кандидат сельскохозяйственных наук, доцент. Количество печатных работ: более 30 (в т.ч. 3 монографии). Область научных интересов: региональная экономика и отраслевая экономика, цифровизация экономических процессов, информационные цифровые технологии. E-mail: nutug123@gmail.com

Deception solutions in the system of economic security of the bank

G.V. Fedotova^I, Yu.A. Kapustina^{II}, R.Kh. Ilyasov^{III}, Qiqige^{IV}

^I Federal State Institution “Federal Research Center “Computer Science and Management” of the Russian Academy of Sciences», Moscow, Russia

^{II} Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russia

^{III} Kadyrov Chechen State University, Grozny, Russia

^{IV} Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia

Abstract. The work is devoted to an overview of current trends in the development of online banking customer service using remote service technologies. The complication of banking digital platforms has led to the formation of information ecosystems that can satisfy a variety of customer needs. Using the SBER ecosystem as an example, it is shown that today banks not only manage customer accounts, but also integrate with marketplaces to provide various non-financial services. The process of accumulation of colossal arrays of personal and confidential information, financial assets attracts the interest of fraudsters working on the Internet. The statistics of cyber theft and unauthorized access to digital services proves that cyber fraud is constantly expanding and is looking for new tools to hack systems. Therefore, the purpose of the work was to substantiate a new approach to building protection based on the detection of cyber-attacks – deception. The goal set led to the solution of the following tasks: the general trends in the complication of banking digital platforms to entire ecosystems were considered, the statistics of cyber fraud on the Internet and the features of targeted cyber-attacks were studied, a new approach to building a system for protecting digital banking services was proposed.

Keywords: security, internet banking, personal data, cyber fraud, theft.

DOI: 10.14357/20790279230212

References

1. Melnik A., Ermolaev K., Kuzmin M. Mechanism for Adjustment of the Companies Innovative Activity Control Indicators to Their Strategic Development Goals Global // Journal of Flexible Systems Management. 2019, № 20(4). P. 189-218. DOI:10.1007/s40171-019-00210-z.
2. Sushil P. Managing Lifetime Wastivity // Global Journal of Flexible Systems Management. 2018, № 19(3). P. 187-189. DOI:10.1007/s40171-018-0194-8.
3. Analytical report “Business Internet Banking Rank 2022”. Electronic resource. Access mode: <https://www.markswebb.ru/report/business-internet-banking-rank-2022/#anchor-about>
4. Burbach D.T. Watts C. Messing with the Enemy: Surviving in a Social Media World of Hackers, Terrorists, Russians, and Fake News // Naval War College Review. 2020, Vol. 73: No. 1, Article 17. Available at: <https://digital-commons.usnwc.edu/nwc-review/vol73/iss1/17>
5. Global trends of the digital economy development / A. V. Kolesnikov, L. E. Zernova, V. V. Degtyareva Yu. I. Sigidov // Opcion. 2020. Vol. 36. No S26. P. 523-540.
6. Fedotova G.V., Kurazova D.A. Cybersecurity threats to the stability of digital platforms // In the collection: BI-technologies and corporate

- information systems in optimizing business processes in the digital economy. Materials of the IX International scientific and practical part-time conference. Rep. for the issue: A.Yu. Kokovikhin, N.M. Surnina, responsible editor V.V. Gorodnichev. Yekaterinburg. 202., P. 118-120.
7. *Buryak V.V.* Hackers, hacktivism and the problem of ensuring cybersecurity in a digital economy / V.V. Buryak // Beneficiary. Kemerovo, 2018. P. 12-18. Access mode: <http://beneficiaryidp.ru/wp-content/uploads/v27.pdf>
8. *Buryak V.V.* Digital economy, hacktivism and cybersecurity: Monograph / V. V. Buryak. Simferopol: IP Zueva T.V., 2019. 140 p.
9. *Klochko E. N., Ledneva O. V.* Evaluation of the effectiveness of the development of the information society in Russia and some countries of the world. Access mode: <http://emag.iis.ru/arc/infosoc/emag.nsf/BPA/f73457f75b45591b44257d63004afb9> (date of access: 01.15.2023).
10. *Bukht R., Hicks R.* Definition, concept and measurement of the digital economy // Vestnik mezhdunarodnykh organizatsii. T. 13. No. 2. P. 143–172. DOI: 10.17323/1996.
11. *Gudkova O.V.* Risks and threats to the economic security of Russia in the context of the digitalization of the economy // Izvestia of higher educational institutions. Series “Economics, Finance and Production Management” [Ivekofin]. 2022. No. 01(51). P. 73-80. DOI: 10.6060/ivekofin.2022511.587.
12. *Ermakova L.V., Gudkova O.V., Dvoretzskaya Yu.A.* Innovative technologies in the banking services market // Bulletin of science and practice. 2018. V. 4. No. 5. P. 424-429. DOI:10.5281/zenodo.1246290.
13. *Silaeva V.V., Nazarova O.G.* The risk management system in customs activities as a direction for ensuring national security in the field of foreign trade // Financial life. 2021. No. 2. P. 28-31.
14. *Makhutov N.A.* Security and risks: system research and development / N.A. Makhutov. – Novosibirsk: Nauka, 2017. 724 p.
15. *Eliseev A.V., Kuznetsov N.K., Mironov A.S.* A systematic approach to assessing the dynamic states of technical objects based on methods of structural mathematical modeling // Proceedings of the ISA RAS. 2022. Volume 72. Issue 1. P. 93-104. DOI: 10.14357/20790279220109.
16. *Livshits V.N., Shatalova O.M., Dmitrieva O.V.* Managed economy: topical issues of public administration in the context of digital transformation // Proceedings of the ISA RAS. 2021. Volume 71. Issue 4. P. 11-22. DOI: 10.14357/20790279210402
17. *Modenov A.K., Vlasov M.P.* Features of economic security in the digital economy // Petersburg Economic Journal. 2020. №2. P. 121-134.
18. *Fedotova G.V., Orlova E.R., Bocharova I.E.* Issues of cybersecurity of digital financial services // Information technologies and computing systems. 2022. №2. pp. 37-45. DOI 10.14357/20718632220205
19. *Kapustina Yu. A., Ilyasov R. Kh., Tsitsige.* The economy of hacktivism is a new vector for the development of shadow business // Bulletin of the South-Western State University. Series: Economy. Sociology. Management. 2022.12(5). P. 56-67.
20. Analytical reports on ICS threats and vulnerabilities on the Kaspersky Threat Intelligence portal. Electronic resource. Access mode: <https://ics-cert.kaspersky.com/services/>
21. Trends in digital transformation of banks 2021–2024. Electronic resource. Access mode: <https://vc.ru/future/338072-trendy-digital-transformacii-bankov-2021-2024>
22. 2022 has become an “anti-record” in terms of the number of viruses for PCs. Electronic resource. Access mode: https://4pda.to/2022/12/06/407105/2022_j_stal_antirekordnym_po_kolichestvu_virusov_dlya_pk/
23. Digital Agenda of the Eurasian Economic Union until 2025: Perspectives and Recommendations Overview. URL: <http://documents.vsemirnyjbank.org/curated/ru/413921522436739705/pdf/EAEU-Overview-Full-RUS-Final.pdf>
24. *Zhilentov A.A., Cherny S.G.* Extracting information from BigData using neural network architectures as networks of information granule associations // Proceedings of the ISA RAS. 2022. Volume 72. Issue. 3. P. 81-90. DOI: 10.14357/20790279220308
25. *George B., Sahar V., Samir D., Grigoris A.* Supply Chain Risk Management and Artificial Intelligence: State of the Art and Future Research Directions // International Journal of Production Research. 2018. No. 7. P. 2179-2202. DOI:10.1080/00207543.2018.1530476.
26. *Sirotyuk V.O.* Methods for constructing and analyzing an ontological model and a reference database for a digital intellectual property fund // Information technologies and computing systems. 2022. No3. P. 58-66. DOI 10.14357/20718632220306
27. *Shvetsov A.N.* The latest information technologies of “digitalization of the economy”: content,

- prospects, costs // Proceedings of the ISA RAS. 2021. Volume 71. Issue. 1. P. 27-35.
28. *Jankowicz D.* Limits to Knowledge Transfer: What They Already Know in the Post-Command Economies // Journal of East-West Business. 2001, № 7(2). P. 37-59. DOI:10.1300/J097v07n02_03.
29. *Clarence W. de Silva.* Vibration. Fundamentals and Practice. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.: CRC Press. 2000. 957 p.
30. *Tapscott, D.* The Digital Economy: Promise and Peril In The Age of Networked Intelligence, McGrawHill. 1995. 342 p.

Fedotova Gilyan Vasilievna. Federal State Institution “Federal Research Center “Computer Science and Management” of the Russian Academy of Sciences”, Moscow, Russia. Leading Researcher. Doctor of Economics, associate professor. Number of printed works: more than 400 (including 20 monographs). Research interests: management of socio-economic processes, regional economics, economics of the agro-industrial complex. E-mail: g_evgeeva@mail.ru (responsible for correspondence)

Kapustina Yulia Alexandrovna. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ural State Forest Engineering University”, Yekaterinburg, Russia. Director of the Socio-Economic Institute. Candidate of Economic Sciences, Associate Professor. The number of printed works is more than 50 (including 5 monographs). Research interests: economic security, management accounting, regional and sectoral economics. E-mail: kapustina_bu@mail.ru

Ilyasov Ruslan Khizrailevich. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Chechen State University named after A.A. Kadyrov, Grozny, Russia. Head of the Department “Accounting, analysis, audit in the digital economy”. Candidate of Economic Sciences, Associate Professor. The number of printed works is more than 80 (including 5 monographs). Research interests: economic security, cybersecurity, digital economy, mathematical methods in economics. E-mail: ilyasov_95@mail.ru

Qiqige. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Russian University of Economics named after G.V. Plekhanov, Moscow, Russia. Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of Management Theory and Business Technologies. Number of publications: more than 30 (including 3 monographs). Research interests: regional economy and branch economy, digitalization of economic processes, digital information technologies. E-mail: nutug123@gmail.com

Trudy Instituta sistemnogo analiza Rossiyskoy akademii nauk (ISA RAN) **(Proceedings of the Institute for Systems Analysis Russian Academy of Sciences (ISA RAS))**

<http://www.isa.ru/proceedings/>

The journal was founded in 2002
The journal is published quarterly

Founder

Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences (FRC CSC RAS)
44/2, Vavilova str., Moscow, 119333, Russia, tel: +7(499)135-62-60,
e-mail: frccsc@frccsc.ru, <http://www.frccsc.ru>

Editor-in-Chief

Popkov Y.S., Academician of RAS, Professor,
9, Prospekt 60-letiya Oktyabrya, Moscow, 117312, Russia,
tel: +7(499)135-42-22, e-mail: popkov@isa.ru

Editorial Chairs

Popkov Y.S., Academician of RAS, Professor
Chairman of Editorial Board (Moscow, Russia)
Konstantinov I.S., Professor (Belgorod, Russia)
Scherbov S.Y., Professor (Vienna, Austria)
Smuelian B.L., Professor (Tel-Aviv, Israel)
Solovyov A.V., Professor,
Deputy Editor-in-Chief (Moscow, Russia)
van Wissen Leonardus J.G., Professor (Amsterdam, Netherlands)

Editorial Board

Aleskerov F.T., Professor (Moscow, Russia)	Lexin V.N., Professor (Moscow, Russia)
Ashimov A.A., Professor (Almaty, Kazakhstan)	Livshits V.N., Professor (Moscow, Russia)
Belov S.P., Professor (Belgorod, Russia)	Magnitsky N.A., Professor (Moscow, Russia)
Bulychev A.V., Pph.D., Executive Secretary (Moscow, Russia)	Mizhidon A.D., Professor (Ulan-Ude, Russia)
Burkov V.N., Professor (Moscow, Russia)	Orlova E.R., Professor (Moscow, Russia)
Gelovani V.A., Academician of RAS, Professor (Moscow, Russia)	Petrovsky A.B., Professor (Moscow, Russia)
Ilin A.V., Professor (Moscow, Russia)	Shvetsov A.N., Professor (Moscow, Russia)
Krut'ko V.N., Professor (Moscow, Russia)	Smirnov A.V., Professor (St. Petersburg, Russia)
	Tishenko V.I., Ph.D. (Moscow, Russia)
	Voytishchek A.V., Professor (Novosibirsk, Russia)

Editorial Office

Shibaeva L.S., managing editor

Editorial address

9, Prospekt 60-letiya Oktyabrya, Moscow, 117312, Russia
E-mail: tisa@isa.ru, tel. +7 (499) 135-24-33, +7 (926) 490-87-87

Scientific journal "Trudy Instituta sistemnogo analiza Rossiyskoy akademii nauk (ISA RAN)" publishes materials on a wide range of fundamental problems of developing systems analysis methodology and its applying to solving various problems in the field of science and practice. The journal is destined for scientists, engineers and researches working within the framework of these problems, as well as for politicians, employees of state and municipal departments, specialists of enterprises and representatives of social organizations. The rules for articles submission to the journal, as well as for their review are given at the journal's site

The journal is registered in Federal service of observing and controlling legislation in the area of mass media and protection of cultural heritage in 20 of May 2016. Digital certificate - III № ФЦ77-65718.
Journal Subscription Index in the Ural-Press e-catalog (<http://ural-press.ru>) is 36089.

The journal is supported by the Department of Information Technologies and Computing Systems of the Russian Academy of Sciences.
The journal is included in the list of leading peer-reviewed scientific journals recommended by the Higher Attestation Commission.
Permission of the editorial board and authors is required when using data of the journal.

© Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences

Vol. **73**
Issue **2**

ISSN 2079-0279

2023

TRUDY
INSTITUTA SISTEMNOGO ANALIZA
ROSSIYSKOY AKADEMII NAUK (ISA RAN)
(PROCEEDINGS OF THE INSTITUTE FOR SYSTEMS ANALYSIS
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES (ISA RAS))

ISBN 978-5-6048784-4-6



Отпечатано в ООО «Поли Принт Сервис»
127015, г. Москва, ул. Бутырская, д. 86
127247, г. Москва, Дмитровское шоссе, д. 100, стр. 2
Формат 60x84/8. Зак. № В-400
Тираж 100 экз.
Тел.: +7 (495) 797-35-59