

РОССИЙСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**RUSSIAN
TECHNOLOGICAL
JOURNAL**



Информационные системы.

Информатика.

Проблемы информационной безопасности

Роботизированные комплексы и системы.

Технологии дистанционного зондирования и неразрушающего контроля

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы

Микро- и нанoeлектроника.

Физика конденсированного состояния

Аналитическое приборостроение и технологии

Математическое моделирование

*Экономика наукоемких и высокотехнологичных
предприятий и производств*

Мировоззренческие основы технологии и общества





ISSN 2500-316X

Э Л Е К Т Р О Н Н О Е С Е Т Е В О Е И З Д А Н И Е

РОССИЙСКИЙ технологический журнал

**RUSSIAN
TECHNOLOGICAL
JOURNAL**

- Информационные системы. Информатика. Проблемы информационной безопасности
- Роботизированные комплексы и системы. Технологии дистанционного зондирования и неразрушающего контроля
- Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
- Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния
- Аналитическое приборостроение и технологии
- Математическое моделирование
- Экономика наукоемких и высокотехнологичных предприятий и производств
- Мировоззренческие основы технологии и общества

- Information Systems. Computer Sciences. Issues of Information Security
- Multiple Robots (Robotic Centers) and Systems. Remote Sensing and Non-Destructive Testing
- Modern Radio Engineering and Telecommunication Systems
- Micro- and Nanoelectronics. Condensed Matter Physics
- Analytical Instrument Engineering and Technology
- Mathematical Modeling
- Economics of Knowledge-Intensive and High-Tech Enterprises and Industries
- Philosophical Foundations of Technology and Society

**Российский технологический журнал =
Russian Technological Journal
2020, том 8, № 4**

**Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal =
Russian Technological Journal
2020, vol. 8, No. 4**

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-4>

<https://www.rtj-mirea.ru>



**Российский технологический журнал =
Russian Technological Journal
2020, том 8, № 4**

Дата опубликования 31 июля 2020 г.

**Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal =
Russian Technological Journal
2020, vol. 8, No. 4
Publication date July, 31 2020.**

Журнал освещает вопросы комплексного развития радиотехнических, телекоммуникационных и информационных систем, электроники и информатики, а также результаты фундаментальных и прикладных междисциплинарных исследований, технологических и организационно-экономических разработок, направленных на развитие и совершенствование современной технологической базы.

Journal highlights the issues of complex development of radio engineering, telecommunication and information systems, electronics and informatics, as well as the results of fundamental and applied interdisciplinary researches, technological and economical developments aimed at the development and improvement of the modern technological base.

Периодичность: 6 раз в год.

Журнал основан в декабре 2013 года. До 2016 года издавался под названием «Вестник МГТУ МИРЭА» (ISSN 2313-5026).

Six issues a year are published.

The journal was founded in December 2013. The name was «Herald of MSTU MIREA» until 2016 (ISSN 2313-5026).

Учредитель и издатель:

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования

«МИРЭА – Российский технологический университет»
119454, РФ, г. Москва, пр-кт Вернадского, д. 78.

Founder and Publisher:

Federal State Budget
Educational Institution
of Higher Education

«MIREA – Russian Technological University»
78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia.

Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых
научных журналов ВАК РФ,
индексируется в
DOAJ,
РИНЦ (Science Index),
Ulrich's International Periodicals Directory.

The journal is included into the List of peer-reviewed science
press of the State Commission for Academic Degrees and
Titles of Russian Federation.
The journal is indexed:
DOAJ, Science Index,
Ulrich's International Periodicals Directory.

Главный редактор:

Сигов Александр Сергеевич — академик РАН, доктор
физ.-мат. наук, профессор, президент МИРЭА – Российского
технологического университета (РТУ МИРЭА), Москва,
Российская Федерация. Scopus Author ID 35557510600,
ResearcherID L-4103-2017,
sigov@mirea.ru.

Editor-in-Chief:

Alexander S. Sigov – Academician of the Russian Academy
of Sciences, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Professor,
President of MIREA – Russian Technological University
(RTU MIREA), Moscow, Russian Federation.
Scopus Author ID 35557510600, ResearcherID L-4103-2017,
sigov@mirea.ru.

Редакция:

Зав. редакцией Г.Д. Середина
Компьютерная верстка Л.Г. Семерня
119571, г. Москва, пр. Вернадского, 86, оф. Л-119.
Тел.: +7(495) 246-05-55 (#2-88).
E-mail: seredina@mirea.ru.

Editorial staff:

Chief of the editorial staff Galina D. Seredina
Desktop publishing Larisa G. Semernya
86, Vernadskogo pr., Moscow, 119571 Russia.
Phone: +7(495) 246-05-55 (#2-88).
E-mail: seredina@mirea.ru.

Свидетельство о регистрации СМИ Эл № ФС 77-74578
от 14.12.2018 г. выдано Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных технологий и массовых
коммуникаций (Роскомнадзор).

Registration certificate Эл № ФС 77-74578,
issued in December 14, 2018 by the Federal Service
for Supervision of Communications, Information Technology,
and Mass Media of Russia.

Редакционная коллегия

Кудж Станислав Алексеевич	проф., д.т.н., ректор РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 56521711400, rector@mirea.ru.
Банис Юрас Йонович	проф., хабилированный доктор наук, проректор Вильнюсского университета, Вильнюс, Литва, Scopus Author ID 16515798800.
Боков Алексей Алексеевич	старший научный сотрудник, химический факультет и 4D LABS, Университет Саймона Фрейзера, Ванкувер, Британская Колумбия, Канада, Scopus Author ID 35564490800, ResearcherID C-6924-2008, http://orcid.org/0000-0003-1126-3378 .
Буслаева Татьяна Максимовна	проф., д.х.н., РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 6602442002, buslaeva@mirea.ru.
Буш Александр Андреевич	проф., д.т.н., директор Института материалов твердотельной электроники РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 7201882802, ResearcherID R-2287-2016, http://orcid.org/0000-0003-3990-9847 , bush@mirea.ru.
Вахрушев Сергей Борисович	проф., д.ф.-м.н., заведующий лабораторией нейтронных исследований Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, профессор кафедры Физической электроники СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия, Scopus Author ID 7004228594, ResearcherID A-9855-2011, http://orcid.org/0000-0003-4867-1404 , s.vakhrushev@mail.ioffe.ru.
Голованова Наталья Борисовна	проф., д.э.н., заместитель первого проректора РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 57191447039, golovanova@mirea.ru.
Гуляев Юрий Васильевич	академик РАН, член Президиума РАН, проф., д.ф.-м.н., научный руководитель Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия, Scopus Author ID 35562581800.
Жуков Дмитрий Олегович	проф., д.т.н., заведующий кафедрой интеллектуальных технологий и систем РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 57189660218, zhukov_do@mirea.ru.
Кимель Алексей Вольдемарович	доцент, к.ф.-м.н., Университет Радбауд, г. Наймеген, Нидерланды, Scopus Author ID 6602091848.
Кондратенко Владимир Степанович	проф., д.т.н., заведующий кафедрой оптических и биотехнических систем и технологий РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 15834985700, kondratenko@mirea.ru.
Крамаров Сергей Олегович	проф., д.ф.-м.н., Южный университет (ИУБиП), Ростов-на-Дону, Россия, Scopus Author ID 56638328000.
Мишина Елена Дмитриевна	проф., д.ф.-м.н., зав. специализированной учебно-научной лабораторией фемтосекундной оптики для нанотехнологий РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 7005350309, ResearcherID D-6402-2014, http://orcid.org/0000-0003-0387-5016 , mishina@mirea.ru.
Пасечник Сергей Вениаминович	проф., д.ф.-м.н., профессор кафедры оптических и биотехнических систем и технологий РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 6701559250, ResearcherID P-7239-2015, http://orcid.org/0000-0002-6050-2761 , pasechnik@mirea.ru.
Перно Филипп	проф., Центральная Школа г. Лилль, Франция, Scopus Author ID 7003429648.
Романов Михаил Петрович	проф., д.т.н., директор Института кибернетики РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 14046079000, m_romanov@mirea.ru.
Савиных Виктор Петрович	член-корр. РАН, Дважды Герой Советского Союза, д.т.н., профессор, президент Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК), Москва, Россия, Scopus Author ID 56412838700, vp@miigaik.ru.
Скотт Джеймс	проф., член Лондонского Королевского общества, Университет Кембриджа, Великобритания, Scopus Author ID 35549214200.
Соколов Виктор Васильевич	проф., д.ф.-м.н., советник по научной работе РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 56951446700, v_sokolov@mirea.ru.
Тимошенко Андрей Всеволодович	проф., д.т.н., проректор по учебной работе РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 56576076700, ResearcherID Y-8709-2018, timoshenko@mirea.ru.
Фетисов Юрий Константинович	проф., д.ф.-м.н., профессор кафедры нанoeлектроники РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 7003504213, fetisov@mirea.ru.
Харин Юрий Семенович	член-корр. НАН Беларуси, проф., д.ф.-м.н., директор НИИ прикладных проблем математики и информатики Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, Scopus Author ID 6603832008, http://orcid.org/0000-0003-4226-2546 , kharin@bsu.by.
Цветков Виктор Яковлевич	проф., д.т.н., советник ректората РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 56069916700, tsvetkov@mirea.ru.

Editorial Board

Stanislav A. Kudzh	Dr. Sci. (Engineering), Professor, Rector of RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 56521711400, rector@mirea.ru.
Yuras Banis	Habilitated Doctor of Sciences, Professor, Vice-Rector of Vilnius University, Vilnius, Lithuania, Scopus Author ID 56521711400.
Alexei A. Bokov	Senior Research Fellow, Department of Chemistry and 4D LABS, Simon Fraser University, Vancouver, British Columbia, Canada, Scopus Author ID 35564490800, ResearcherID C-6924-2008, http://orcid.org/0000-0003-1126-3378 .
Tatyana M. Buslaeva	Dr. Sci. (Chemistry), Professor, RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 6602442002, buslaeva@mirea.ru.
Alexander A. Bush	Dr. Sci. (Engineering), Professor, Director of the Institute of Materials of Solid State Electronics, RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 7201882802, ResearcherID R-2287-2016, http://orcid.org/0000-0003-3990-9847 , bush@mirea.ru.
Sergey B. Vakhrushev	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Laboratory of Neutron Research, A.F. Ioffe Physico-Technical Institute of the RAS, Department of Physical Electronics of St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation, Scopus Author ID 7004228594, ResearcherID A-9855-2011, http://orcid.org/0000-0003-4867-1404 , s.vakhrushev@mail.ioffe.ru.
Nataliya B. Golovanova	Dr. Sci. (Economics), Professor, Deputy First Vice-Rector of RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 57191447039, golovanova@mirea.ru.
Yury V. Gulyaev	Academician of the RAS, Dr. of Sci. (Phys.-Math.), Professor, Supervisor of V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 35562581800.
Dmitry O. Zhukov	Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Intelligent Technologies and Systems, RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 57189660218, zhukov_do@mirea.ru.
Alexey V. Kimel	Ph. D. (Phys.-Math.), Associate Professor, Radboud University, Nijmegen, Netherlands, Scopus Author ID 6602091848.
Vladimir S. Kondratenko	Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Optical and Biotechnical Systems and Technologies, RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 15834985700, kondratenko@mirea.ru.
Sergey O. Kramarov	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Southern University (IMBL), Rostov-on-Don, Russian Federation, Scopus Author ID 56638328000.
Elena D. Mishina	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Specialized Educational and Research Laboratory of Femtosecond Optics for Nanotechnologies, RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 7005350309, ResearcherID D-6402-2014, http://orcid.org/0000-0003-0387-5016 , mishina@mirea.ru.
Sergey V. Pasechnik	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Department of Optical and Biotechnical Systems and Technologies, RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 6701559250, ResearcherID P-7239-2015, http://orcid.org/0000-0002-6050-2761 , pasechnik@mirea.ru.
Philippe Pernod	Professor, Dean of Research, University of Lille, Villeneuve-d'Ascq, France, Scopus Author ID 7003429648.
Mikhail P. Romanov	Dr. Sci. (Engineering), Professor, Director of the Institute of Cybernetics, RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 14046079000, m_romanov@mirea.ru.
Viktor P. Savinykh	Corr. Member of the RAS, Dr. Sci. (Engineering), Professor, President of Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 56412838700, vp@miigaik.ru.
James F. Scott	Professor, Fellow of the Royal Society of London, Cambridge University, United Kingdom, Scopus Author ID 35549214200.
Viktor V. Sokolov	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Adviser on Scientific Work of RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 56951446700, v_sokolov@mirea.ru.
Andrey V. Timoshenko	Dr. Sci. (Engineering), Professor, Vice Rector for Academic Affairs of RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 56576076700, ResearcherID Y-8709-2018, timoshenko@mirea.ru.
Yury K. Fetisov	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Department of Nanoelectronics, RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 7003504213, fetisov@mirea.ru.
Yury S. Kharin	Corr. Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Director of the Institute of Applied Problems of Mathematics and Informatics of the Belarusian State University, Minsk, Belarus, Scopus Author ID 6603832008, http://orcid.org/0000-0003-4226-2546 , kharin@bsu.by.
Viktor Ya. Tsvetkov	Dr. Sci. (Engineering), Professor, Councilor of the Administration of RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 56069916700, tsvetkov@mirea.ru.

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ. ИНФОРМАТИКА. ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

- Андрианова Е.Г., Головин С.А., Зыков С.В., Лесько С.А., Чукалина Е.Р.**
Обзор современных моделей и методов анализа временных рядов
динамики процессов в социальных, экономических
и социотехнических системах 7
- Зуев А.С., Макущенко М.А., Иванов М.Е., Меркулов Е.С.**
Технологии расширенной реальности – новый компонент промышленной
инженерии и производственных систем 46

МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА. ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

- Бородина В.В., Крамаров С.О.**
Влияние механических напряжений на доменную структуру монокристаллов
многоосных сегнетоэлектриков (на примере титаната бария) 66

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

- Алехин В.А.**
Проектирование электронных систем с использованием SystemC
и SystemC–AMS 79
- Карпов Д.А., Струченков В.И.**
Динамическое программирование в прикладных задачах,
допускающих сокращение перебора вариантов 96

МИРОВОЗЗРЕНЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ И ОБЩЕСТВА

- Кудж С.А., Голованова Н.Б.**
О совершенствовании механизмов подготовки научно-педагогических
кадров и перспективы целевого обучения в интересах вузов 112
- Михайлов В.М.**
Структуризация дисциплин «Инженерная экология» и «Безопасность
жизнедеятельности» как средство повышения качества их усвоения 129
- Шишманова П.Д.**
Сравнительный анализ основных характеристик человеческого капитала
в Болгарии и России 141

CONTENTS

INFORMATION SYSTEMS. COMPUTER SCIENCES. ISSUES OF INFORMATION SECURITY

- Andrianova E.G., Golovin S.A., Zykov S.V., Lesko S.A., Chukalina E.R.**
Review on modern models and methods for analysis of time series of dynamics of processes in social, economic and socio-technical systems 7
- Zuev A.S., Makushchenko M.A., Ivanov M.E., Merkulov Y.S.**
Extended reality technology – a new component in industrial engineering and production systems 46

MICRO- AND NANOELECTRONICS. CONDENSED MATTER PHYSICS

- Borodina V.V., Kramarov S.O.**
Effect of mechanical stresses on the domain structure of barium titanate single crystals 66

MATHEMATIC MODELING

- Alekhin V.A.**
Designing electronic systems using SystemC and SystemC–AMS 79
- Karpov D.A., Struchenkov V.I.**
Dynamic programming in applied tasks which allow to reduce the options selection 96

PHILOSOPHICAL FOUNDATIONS OF TECHNOLOGY AND SOCIETY

- Kudzh S.A., Golovanova N.B.**
On improving mechanisms for training teaching staff and prospects for targeted learning in favor of universities 112
- Mikhailov V.M.**
Structuring of the disciplines “Engineering ecology” and “Life safety” as a means of improving the quality of their learning 129
- Shishmanova P.D.**
A comparative analysis of the main characteristics of human capital in Bulgaria and Russia 141

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-4-7-45>



УДК 004.942, 004.048, 001.51, 519.688

Обзор современных моделей и методов анализа временных рядов динамики процессов в социальных, экономических и социотехнических системах

**Е.Г. Андрианова^{1,®},
С.А. Головин¹,
С.В. Зыков²,
С.А. Лесько¹,
Е.Р. Чукалина¹**

¹МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

²НИУ «Высшая школа экономики», Москва 101000, Россия

[®]Автор для переписки, e-mail: andrianova@mirea.ru

Описаны направления перспективных исследований в области анализа и моделирования динамики временных рядов процессов в сложных системах с присутствием человеческого фактора. Динамика процессов в таких системах описывается нестационарными временными рядами. Прогнозирование эволюции подобных систем имеет большое значение для управления процессами в социальных (избирательные кампании), экономических (фондовые, фьючерсные и сырьевые рынки) и социотехнических системах (социальные сети). Приведены общие сведения о временных рядах и задачах их анализа. Рассмотрены современные методы анализа временных рядов для экономических процессов. Результаты показывают, что экономические процессы нельзя считать полностью случайными, так как они имеют тенденцию к самоорганизации и, кроме того, подвержены влиянию памяти о предыдущих состояниях. Выявлено, что одной из главных задач при моделировании процессов в социотехнических системах (например, социальных сетях) является разработка математического аппарата для приведения данных к единой

шкале измерений. Проанализированы современные модели анализа и прогнозирования электоральных процессов на основе анализа временных рядов: структурные, опросные, гибридные. На основе проведенного анализа рассмотрены их достоинства и недостатки. В заключении подтвержден вывод, что для описания процессов в сложных системах с наличием человеческого фактора помимо традиционных факторов, необходимо разрабатывать и использовать методы и инструментальные средства для учета возможности самоорганизации человеческих групп и наличия памяти о предыдущих состояниях системы.

Ключевые слова: нестационарные временные ряды, сложные системы, анализ экономических и социальных процессов, анализ социальных сетей, прогнозирование эволюции временных рядов, модели и методы анализа временных рядов, человеческий фактор, электоральные процессы, самоорганизация системы.

Для цитирования: Андрианова Е.Г., Головин С.А., Зыков С.В., Лесько С.А., Чукалина Е.Р. Обзор современных моделей и методов анализа временных рядов динамики процессов в социальных, экономических и социотехнических системах. *Российский технологический журнал*. 2020;8(4):7-45. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-4-7-45>

Review of modern models and methods of analysis of time series of dynamics of processes in social, economic and socio-technical systems

**Elena G. Andrianova^{1,@},
Sergey A. Golovin¹,
Sergey V. Zykov²,
Sergey A. Lesko¹,
Ekaterina R. Chukalina¹**

¹MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

²NRU "Higher School of Economics", Moscow 101000, Russia

@Corresponding author, e-mail: andrianova@mirea.ru

The directions of perspective research in the field of analysis and modeling of the dynamics of time series of processes in complex systems with the presence of the human factor are described. The dynamics of processes in such systems is described by non-stationary time series. Predicting the evolution of such systems is of great importance for managing processes in social (election campaigns), economic (stock, futures and commodity markets) and socio-technical systems (social networks). The general information on time series and tasks of their analysis is given. Modern methods of time series analysis for economic processes are considered. The results show that economic processes cannot be considered completely random, since they tend to self-organize and, moreover, are subject to the influence of memory of previous states. It was revealed that one of the main tasks in modeling processes in sociotechnical systems (for example, social networks) is the development of a mathematical apparatus for bringing data to a single measurement scale. The modern models of analysis and forecasting of electoral processes based on the analysis of time series: structural, polling, hybrid. Based on the analysis, their advantages and disadvantages are considered. In conclusion, it was concluded that to describe processes in

complex systems with the presence of the human factor, in addition to traditional factors, it is necessary to develop and use methods and tools to take into account the possibility of self-organization of human groups and the presence of memory about previous states of the system.

Keywords: non-stationary time series, complex systems, analysis of economic and social processes, analysis of social networks, forecasting the evolution of time series, models and methods of analysis of time series, human factor, electoral processes, self-organization of the system.

For citation: Andrianova E.G., Golovin S.A., Zykov S.V., Lesko S.A., Chukalina E.R. Review of modern models and methods of analysis of time series of dynamics of processes in social, economic and socio-technical systems. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(4):7-45 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-4-7-45>

Введение

Анализ динамики временных рядов и прогнозирование их эволюции имеют большое значение для управления различными процессами в социальных (например, избирательные кампании), экономических (фондовые, фьючерсные и сырьевые рынки) и социотехнических системах (например, социальные сети).

Следует отметить, что сложность наблюдаемых процессов существенным образом возрастает при переходе от технических к социотехническим и далее – к социальным системам. Многие технические системы по непредсказуемости наблюдаемых процессов уступают системам, в которых одним из элементов является человек. Если для прогнозирования динамики процессов в технических системах основной проблемой является наличие существенной стохастичности, то в социальных, экономических и социотехнических системах появляется человеческий фактор.

С одной стороны, появление человеческого фактора приводит к стохастичности свойств и неопределенности в социальных, экономических и социотехнических системах. С другой стороны, наличие человеческого фактора создает предпосылки для самоорганизации системы и определяет существование памяти о её предыдущих состояниях. Всё это приводит к появлению организованной сложности (эмерджентности). Возникновение эмерджентности является результатом появления системных связей и адаптивного перераспределения функций между элементами системы. Таким образом динамика процессов в социальных, экономических и социотехнических системах описывается нестационарными временными рядами, а попытки представить их в виде квазистационарных участков могут приводить к неправильному описанию наблюдаемых процессов и неверному построению управляющих прогнозов.

При описании эволюции временных рядов важным моментом является определение так называемых точек «разладки» (в экономике это называется «точкой смены тренда»). Поясним этот эффект на примере технических систем. В процессе своего функционирования технические системы могут испытывать случайные широкополосные и сложно-периодические возмущения (так называемые ритм-сигналы), не подпадающие ни под один из известных законов распределения случайных величин, что в некоторых случа-

ях может привести к аномальному состоянию технической системы («разладке»). Большинство традиционных методов и моделей для выявления эффекта «разладки» основываются на предположении, что вероятностные характеристики выходного ритм-сигнала у исправного технического объекта с течением времени не изменяются, т.е. измеренный стохастический сигнал является стационарным. В таких методах обычно используют преобразование Фурье (Fast Fourier Transform – FFT), распределение Вигнера – Вилля, вейвлет-преобразование или преобразование Гильберта – Хуанга. Если ритм-сигналы носят сложный нестационарный характер, тогда применение традиционных методов выявления разладок в технических системах невозможно и необходимы новые методы анализа динамики нестационарных временных рядов. Следует отметить, что технические системы при всей сложности реализующихся в них процессов являются более простыми и детерминированными по отношению к экономическим, и тем более социальным или социотехническим системам, поскольку в них все основные характеристики процессов могут быть измерены числовыми физическими величинами.

Одним из важнейших примеров и объектов социотехнических систем являются социальные сети. Важность изучения нестационарных временных рядов, описывающих процессы в социотехнических системах, заключается в том, что в последние несколько лет наблюдается значительный рост влияния событий, происходящих в интернете, как на политические, так и на социальные процессы в мире. Одним из примеров успешного использования социальных сетей можно назвать предвыборную кампанию Барака Обамы в США в 2007 и 2008 годах [1]. Благодаря революционным методам мобилизации социальных сетей была получена поддержка огромной аудитории и собраны необходимые деньги. Ещё одним примером может послужить предвыборная кампания в Израиле в 2015 году [2], когда кандидаты, стремясь привлечь избирателей, активно пользовались социальными сетями, проводя различные акции. В одном из видеороликов Биньямин Нетаньяху, нынешний премьер-министр, выступил в роли детской сиделки, намекая, что никто лучше него не обеспечит безопасность детей в Израиле.

Актуальность проведения теоретических и практических исследований процессов, описываемых нестационарными временными рядами в социальных, экономических и социотехнических системах, обуславливается необходимостью разработки методик прогнозирования поведения людей в обществе, возникновения новых запросов и потребностей, а также предотвращения негативных настроений. Особенно важным это становится в связи с появлением и развитием новых информационных технологий. В частности, события последнего времени показывают невозможность введения полного контроля над интернетом и социальными сетями. В частности, компания SpaceX анонсировала технологию дешевого спутникового доступа в интернет практически с любого мобильного устройства. Эта технология обеспечивает неконтролируемую национальными правительствами передачу данных [3]. Кроме того, необходимо учитывать и возможности использования так называемых анонимайзеров (обеспечивают анонимность выхода в интернет) и методов шифрования данных для затруднения обнаружения действий пользователей сетей.

1. Свойства и модели временных рядов

Временным рядом $\{x_i\}_{i=1}^n$ называется массив из n чисел, представляющих собой значения некоторой наблюдаемой динамической переменной $x(t)$ с некоторым постоянным шагом τ по времени, $t_i = t_0 + (i-1)\tau$; $x_i = x(t_i)$, $i = 1, \dots, n$.

Таким образом, любой временной ряд имеет два обязательных элемента: время и уровень ряда (конкретное значение показателя). Их можно различать по следующим признакам:

- время (моментное, интервальное);
- форма представления уровней (временные ряды абсолютных, относительных и средних величин);
- расстояние между интервалами времени (полные и неполные временные ряды);
- содержание показателей (временные ряды частных и агрегированных показателей).

Для корректного формирования временных рядов наиболее важным параметром является сопоставимость уровней, образующих их.

В теории временных рядов выделяют две основные задачи: идентификации и прогноза.

Методы прогнозирования разделяют на две группы [4]: интуитивные и формализованные. Первая группа методов не предполагает разработку моделей прогнозирования и отражает суждения экспертов. Данная группа методов применяется, когда объект слишком прост или настолько сложен, что невозможно аналитически учесть влияние внешних факторов. Вторая группа методов основывается на построении модели прогнозирования.

Наиболее активно используемыми при моделировании сложных процессов являются регрессионные модели. Регрессионные модели прогнозирования представляют собой функцию независимой переменной и параметров с добавленной случайной переменной. Простая линейная регрессия описывается следующим уравнением:

$$Z(t) = \alpha_0 + \alpha_1 X(t) + \varepsilon_t,$$

где α_0 , α_1 – коэффициенты регрессии, ε_t – ошибка модели.

Целью анализа является выявление зависимости между исходной переменной и внешними факторами. Для определения коэффициентов регрессии используются метод наименьших квадратов и метод максимального правдоподобия. Помимо простой линейной регрессии используют множественную и нелинейную регрессию.

Авторегрессионные модели прогнозирования основываются на модели временных рядов, в которой значения временного ряда в данный момент линейно зависят от предыдущих значений этого же ряда.

Наиболее популярными являются модель авторегрессии

$$Z(t) = C + \phi_1 Z(t-1) + \phi_2 Z(t-2) + \dots + \phi_n Z(t-p) + \varepsilon_t,$$

где C – вещественная константа, $\phi_1, \phi_2 \dots \phi_n$ – коэффициенты, p – порядок авторегрессии, ε_t – ошибка модели,

и модель скользящего среднего:

$$Z(t) = \frac{1}{q}(Z(t-1) + Z(t-2) + \dots + Z(t-q)) + \varepsilon_t,$$

где q – порядок скользящего среднего, ε_t – ошибка прогнозирования.

Часто в одной модели объединяют модели авторегрессии и скользящего среднего. Такая объединенная модель представляет собой фильтр в виде скользящего среднего порядка q и авторегрессию фильтрованных значений процесса порядка p .

В моделях экспоненциального сглаживания (взвешенное скользящее среднее, экспоненциальное сглаживание, модель Хольта, модель Хольта – Винтерса) выявление и анализ тенденции временного ряда часто производится с помощью его выравнивания или сглаживания. В основу экспоненциального сглаживания заложена идея постоянного пересмотра прогнозных значений по мере поступления фактических.

Функция модели имеет вид:

$$Z(t) = S(t) + \varepsilon_t,$$

$$Z(t) = \alpha \cdot Z(t-1) + (1-\alpha) \cdot S(t-1),$$

где α – коэффициент сглаживания, меняющийся от нуля до единицы, а $S(1) = Z(0)$ – начальные условия. В данной модели каждое последующее сглаженное значение $S(t)$ является взвешенным средним между предыдущим значением временного ряда $Z(t)$ и предыдущим сглаженным значением $S(t-1)$. Такие модели наиболее подходят для долгосрочного прогнозирования.

При помощи модели на нейронных сетях возможно моделирование нелинейной зависимости будущего значения временного ряда от его фактических значений и от значений внешних факторов. Модель на основе искусственных нейронных сетей, состоящих из нейронов, описывается уравнениями:

$$U(t) = \sum_{i=1}^m \omega_i \cdot Z(t-i) + b,$$

$$Z(t) = \phi(U(t)),$$

где $Z(T-1), \dots, Z(t-m)$ – входные сигналы, $\omega_1, \dots, \omega_m$ – синаптические веса нейрона, b – порог, $\phi(U(t))$ – функция активации (функция единичного скачка, кусочно-линейная функция, сигмоидальная функция).

Существуют также модели на цепях Маркова, на классификационно-регрессионных деревьях, на основе генетического алгоритма, на опорных векторах, на основе передаточных функций, на нечеткой логике и т.д. Также отметим, что на сегодняшний день существует множество модификаций названных моделей.

Из-за нелинейности и изменчивости характеристик нестационарных временных рядов процессов, протекающих в сложных социальных, экономических и социотехнических системах, традиционные методы анализа и моделирования, например, такие как интегрированная модель авторегрессии – скользящего среднего (ARIMA,

модель Бокса – Дженкинса [4]) и многие другие часто приводят к неточным или ошибочным результатам.

Традиционный подход к анализу нестационарных временных рядов основан на том, чтобы с помощью применения линейных методов свести их к стационарным временным рядам, например упомянутые модели ARIMA.

Эти модели оперируют не с функциями распределения, а непосредственно с элементами временного ряда. Ряды, не укладывающиеся в рамки регрессионного анализа, чаще всего изучаются различными адаптивными эвристическими методами, не имеющими четкого математического обоснования. В них предполагается, что ряды на некоторой длине могут быть описаны стационарной моделью типа регрессии или авторегрессии, а параметры модели могут быть пересчитаны с учетом новой информации или с учетом сравнения предсказанного значения с фактом. Недостатком этих подходов является то, что длина участка возможной стационарности является неизвестной величиной и в любой момент времени может произойти смена тренда (разладка).

Задача прогнозирования в стационарном случае может быть сведена к задаче аппроксимации средних величин. Для стационарных случайных процессов выборочное распределение сходится по вероятности к теоретическому. Существуют независимые от времени конечные моменты теоретического распределения нескольких первых порядков (математическое ожидание, дисперсия, асимметрия, эксцесс) и отклонения выборочных моментов от их теоретических значений распределены асимптотически нормально.

В настоящее время существует более тысячи статистических тестов (критериев), которые применяются для того, чтобы отнести изучаемый случайный процесс к тому или иному классу и использовать для его описания определенную математическую модель. В прикладных задачах часто используется критерий согласия Колмогорова (1933 г.) для определения близости выборочной функции распределения случайной величины к стационарному распределению. В дальнейшем на его основе были получены другие широко применяемые асимптотические критерии [5–9] о принадлежности двух выборочных распределений одной генеральной совокупности: критерий Колмогорова – Смирнова (1939 г.), Вальда – Волфовица (1940 г.), Вилкоксона (1945 г.), Манна – Уитни (1947 г.), Гнеденко – Королюка (1951 г.), критерий тренда в среднем значении Аббе – Линника [10, 11], критерий тренда в дисперсии Фостера – Стюарта [10, 12] и другие критерии, применяемые к оценкам выборочных моментов (Стьюдента, Фишера, Крамера – Уэлча, «омега-квадрат» и др.) [13].

Доверительные вероятности и доверительные интервалы для выборочных оценок параметров стационарных распределений могут быть получены на основе теоремы Вольда (1938 г.), согласно которой любой стационарный случайный процесс представляется в виде суперпозиции детерминированного процесса и белого шума, и теоремы Гофдинга (1948 г.), которая позволяет определить скорость сходимости по вероятности выборочных моментов и вероятность отклонения их значений от теоретических (если моменты генеральной совокупности для стационарной случайной величины распределены асимптотически нормально).

Перечисленные утверждения позволяют представить стационарный временной ряд в виде суммы детерминированной составляющей (трендовой или периодической)

и остатка, автокорреляционная функция которого с достаточной точностью близка к нулю, что свидетельствует о близости остатка к белому шуму. После этого ставится задача о нахождении наиболее близкой статистики (функции распределения), моделирующей поведение остатка. В адаптивных методах описания априори не известно, является ли ряд стационарным или нет, а также по выборке какого объема следует находить, например, скользящее среднее, чтобы получить наименьшую ошибку прогноза.

Для нестационарных временных рядов индикаторы тех или иных его свойств имеют свой специфический вид, не обобщаемый на ряды другого типа. Например, индикатор линейного тренда не особенно эффективен для рядов с квазипериодическим изменением, как и индикатор нестационарности дисперсии для рядов с квазилинейным трендом [14]. Более того, индикаторы, основанные на некоторых средних характеристиках ряда (например, несколько первых моментов), не образуют базисной системы, по которой можно определить тенденцию локального по времени изменения случайного процесса.

Корректно оценить вероятность того или иного значения функционала от генеральной совокупности по одной выборке (интервалу реализации временного ряда) можно только для стационарных процессов. Однако во многих практических задачах при большом числе наблюдений за случайным процессом, осуществляемым в скользящем окне, обнаруживается, что если процесс не является стационарным, то число ошибок в принятии той или иной статистической гипотезы оказывается в разы больше, чем уровень значимости, на котором по классическому критерию принималось решение.

В случае нестационарных временных рядов все асимптотические критерии, гарантирующие увеличение точности аппроксимации с увеличением объема выборки, оказываются несостоятельными. Аналогичные проблемы возникают и при использовании сглаженного скользящего усреднения. Если ряд нестационарный, то средние (скользящие, «растущие» – т.е. взятые по выборке растущего объема, или любые другие) не являются состоятельными оценками моментов распределения, так как сходимости по вероятности в общем случае нет.

В нестационарном случае отсутствует само понятие генеральной совокупности, что делает неприменимым аппарат математической статистики, кроме тех случаев, когда априори известна функциональная принадлежность модели процесса к классу распределения, что на практике, как правило, неизвестно.

При исследовании стационарных случайных процессов, согласно теореме Гливенко (о сходимости эмпирической вероятности к теоретическому распределению) [15], чем больше будет учтено наблюдаемых значений, тем точнее могут быть получены теоретические характеристики распределения случайной величины из определенного промежутка. Для нестационарных случайных процессов данное условие, в силу их специфики, не может быть выполнено, что затрудняет возможность использования результатов их анализа для дальнейшего прогнозирования. Нестационарность не позволяет получить достаточно большое число значений величины временного ряда для построения генеральной совокупности. При анализе стационарного процесса полученные значения математического ожидания и дисперсии случайной величины могут быть использованы для построения прогноза на любых интервалах времени наблюдения, в случае нестационарных временных рядов возникает момент разладки, после которого полученные ранее ха-

рактеристики распределения не могут давать точный прогноз дальнейшего поведения временного ряда.

В работах [7, 13, 16, 17] приведены непараметрические критерии оценивания данных, использующие методы математического моделирования Монте-Карло [17, 18]. Однако, следует отметить, что эти методы применимы только к стационарным распределениям и не могут корректно использоваться для анализа нестационарных временных рядов.

Например, в работе [18] для моделирования траекторий некоторого случайного процесса со скачками, применительно к ценам акций предприятий авиационной отрасли РФ, используются стохастические дифференциальные уравнения с зависящими от времени коэффициентами сноса и диффузии и эрланговский поток событий для описания скачков, но практическая реализация случайных траекторий основана на стационарном методе Монте-Карло при постоянных коэффициентах стохастического уравнения.

Учитывая всё вышесказанное, можно сделать вывод, что необходим поиск новых методов анализа динамики сложных систем или новых подходов к описанию нестационарных временных рядов, особенно если возможна самоорганизация таких систем и наличие памяти о предыдущих состояниях, например, моделей и методов, основанных на различных видах или сочетаниях алгоритмов машинного обучения, таких как нейронные сети [19–22], нечеткая логика [23], метод опорных векторов регрессии [24], наборы правил на основе генетического программирования сетевых приложений [25] и ряда других.

2. Моделирование экономических процессов на основе анализа временных рядов

Следует отметить, что наиболее хорошо область анализа временных рядов была проработана для экономических процессов (в силу заинтересованности большим числом их участников в получении положительных результатов).

В статье [19] описан новый подход к фундаментальному анализу данных нестационарных временных рядов для выявления связей между поведением рынка и внешней информацией, выдвинута гипотеза о возможной логической актуальности некоторой внешнеэкономической информации и ценовых движений валютной пары USD/GBP. Авторы [19] с использованием нейронных сетей провели ряд экспертиз с целью определения существования правдоподобных связей между внешними источниками информации и ценовыми движениями валютной пары. Авторы [19] применяют два класса моделей искусственного интеллекта: нейронную сеть Psi Sigma (PSI) и эволюционный алгоритм Gene Expression (GEP). Было показано, что PSI способна фиксировать корреляции более высокого порядка в наборе данных, а GEP определяет различия между генотипом и фенотипом. Это позволяет получить более точное прогнозирование по сравнению с «традиционными» моделями. В работе [20] утверждается, что нейронные сети хорошо подходят для моделирования движения цен и дают возможность извлекать информацию из больших объемов данных, которая необходима для анализа сложных сигналов о движении финансовых индексов и цен.

Авторы [20] применяют как параметрические (нейронные сети с активными нейронами), так и непараметрические (аналоговые комплексобразующие) методы самоорганизующегося моделирования для ежедневного прогнозирования валютного рынка. В работе предлагается комбинированный подход, при котором параметри-

ческие и непараметрические методы самоорганизации объединяются последовательно, используя преимущества отдельных методов с целью повышения их производительности. Сначала рассматривается параметрический подход для нейронных сетей с активными нейронами. Затем обсуждается непараметрический метод самоорганизующегося моделирования, известный как аналоговое комплексирование (Analog Complexing) и, наконец, описывается новый гибридный метод, вытекающий из последовательной комбинации двух предыдущих. Авторы показали, что комбинированный метод дает хорошие результаты и превосходит отдельные при тестировании с двумя обменными курсами: американский доллар и немецкая марка по отношению к британскому фунту.

В работе [21] рассматривается методология проектирования и тестирования биржевых торговых систем (роботов), использующих технологии мягких вычислений (нечеткой логики) и искусственные нейронные сети (ANN). Представленная в работе методология отделяет процесс обучения нейронных сетей и выбора параметров процесса невыборочного бенчмаркинга. Для обучения и тестирования ANN данные должны быть логически (или физически) разделены как минимум на два набора – набор обучения и набор тестирования. Основной принцип заключается в том, чтобы охватить как можно более разнообразную рыночную активность (с длительным обучением), сохраняя при этом как можно более длинное окно тестирования (чтобы увеличить уверенность в модели).

В работе [24] на основе теории хаоса представлена непараметрическая модель для прогнозирования будущего поведения валютных курсов. Теория хаоса предполагает, что поведение финансовых рынков хаотично и обеспечивает основу для учета динамики нелинейных систем, которые могут выявлять скрытые шаблоны и тенденции в финансовых данных, и которые, в свою очередь, не могут быть получены обычными статистическими методами. Предложенная двухступенчатая модель сочетает в себе фазовое пространство, реконструированное из одномерных хаотических временных рядов в комбинации с векторной регрессией. На первом этапе метод вложения координат задержки преобразует необработанные временные ряды в фазовое пространство, подходящее для прогнозирования. На втором этапе стандартная векторная регрессия поддержки (SVR) применяется к преобразованной серии для окончательного прогнозирования. Радиальная базисная функция используется как ядро SVR. Полученная модель, названная «Chaos – SVR», превосходит обычную SVR, нейронную сеть обратного распространения («BPNN») и ее комбинацию с преобразованным фазовым пространством («Chaos – BPNN») на общих метриках для измерения производительности модели, таких как MSE (средняя квадратичная ошибка), RMSE (среднее значение квадрата ошибки) и MAE (средняя абсолютная ошибка).

Однако следует отметить, что в реальности биржевые рынки обладают свойством самоорганизации и памятью о предыдущих событиях, т.е. не могут быть описаны в полной мере теорией хаоса.

В работе [26] представлен новый подход к анализу нечетких временных рядов высокого порядка. Авторы использовали адаптивный упорядоченный нечеткий временной ряд (FTS) для прогнозирования на валютном рынке FOREX. Исходный ряд с помощью быстрой самоорганизующейся стратегии разбивается на неравные интервалы, а выбор порядка ряда осуществляется с помощью адаптивного алгоритма. Предложенная модель

анализа состоит из двух этапов. На первом – осуществляется использование самоорганизующихся карт (SOM), которые позволяют осуществить более быструю кластеризацию данных по сравнению с генетическими алгоритмами (GA). На втором – производится адаптивный выбор порядка ряда, для чего используется метод трех агентов, которые являются агентом голосования, статистическим агентом и эмоциональным агентом. Эти агенты работают последовательно, чтобы найти наилучший порядок высокоуровневых нечетких временных рядов. Агент по голосованию пытается достичь консенсуса между различными решениями. При выборе порядка нечеткого временного ряда используются статистический анализ и методы принятия эмоциональных решений. Сравнение предложенного метода с более ранними исследованиями демонстрирует улучшенную точность прогнозирования при одинаковых затратах на вычисления.

В [27] авторы используют генетическое сетевое программирование (GNP) на основе правил для создания системы принятия решений на фондовом рынке. GNP с накоплением правил – это алгоритм, который извлекает большое количество правил из действий пользователей на протяжении поколений и хранит их в пулах правил, что отличается от общих эволюционных вычислений. GNP с накоплением правил можно рассматривать в качестве эволюционирующих генераторов правил на этапе обучения, а созданные правила в пулах правил – использовать для принятия решений. Большое количество правил купли-продажи извлекается из действий отдельных пользователей, а затем используется механизм классификации, чтобы правильно определить, покупать или продавать акции на основе извлеченных правил. Преимущество GNP заключается в том, чтобы запоминать различные ситуации, имевшие место в период обучения и хранить их в качестве правил в пулах правил. Однако технические аналитики считают, что в графике рынка есть закономерности, которые не могут быть обнаружены.

Следует особо подчеркнуть, что многие из описанных выше подходов являются очень хорошим инструментом, но качество их применения ограничивается несовершенством математических моделей, используемых для исследования динамики формирования временных рядов.

Анализ и прогнозирование поведения нестационарных временных рядов могут быть основаны на применении выборочных функций распределения. Временной ряд разделяется на отдельные области, в каждой из которых он является квазистационарным, со своей выборочной функцией распределения, а между областями имеется часть ряда, в которой происходит переходной процесс (разладка). Продолжительность переходного процесса определяется как факторами, характеризующими смену режима (собственно разладка), так и объемом выборки, который используется для проведения статистического анализа [13]. Параметры выборочной функции распределения могут быть установлены на основе анализа данных, наблюдаемых на заданном интервале времени. На практике необходимо решить две задачи. Во-первых, определить интервал времени квазистационарности. Во-вторых, понять наступление разладки в течение переходного периода, причем с минимальным запаздыванием. Следовательно, объем выборки должен быть заведомо меньше длительности переходного периода, но в то же время достаточным для того, чтобы оценки вероятностного распределения были достоверны [13]. Таким образом, возникает самосогласованная оптимизационная задача по определению индикатора разладки с наибольшей достоверностью.

Недостатком многих подходов является то, что они применяются к единственной реализации случайного процесса, тогда как для эволюционирующих распределений методически более корректно изучать ансамбль возможных траекторий. Если функция распределения нестационарна, то обучение алгоритма распознавания на прошлых данных часто оказывается несостоятельным. Имеется только одна траектория, которая в силу нестационарности не позволяет использовать большой объем выборки для тестирования тех или иных индикаторов локального поведения временного ряда с целью оценки вероятности их правильного срабатывания при выборе биржевой стратегии.

Для анализа нестационарных процессов можно использовать методы, основанные на анализе эволюции семейства выборочных распределений процесса, отличающихся объемами выборок. В работе [28] описана так называемая горизонтная статистика и изучены некоторые ее свойства для индикации смены уровня хаоса нестационарных временных рядов. Данный подход был далее развит в работе [13], где используются нестационарные статистики и определяются расстояния между выборочными плотностями функций распределения в различных нормах, получившие название согласованный уровень нестационарности, а также вводится понятие статистической добротности ряда для их согласования. По мнению авторов, эта статистика позволяет более точно определить моменты разладки.

Идентификация состояния нестационарного случайного процесса может быть сформулирована как задача распознавания выборочной функции распределения (ВФР) как принадлежащей определенной генеральной совокупности. Это может быть решено либо путем оценивания значений параметров распределения известного функционального вида, либо в рамках непараметрического подхода с использованием критерия Колмогорова – Смирнова [29].

На практике часто возникает задача тестирования функционала управления, заданного на траектории случайного процесса. Примером такого функционала является фондовый рынок, правила входа-выхода на который и их численные значения должны быть оптимизированы не по одной траектории, а по ансамблю траекторий. В результате необходимо также иметь генератор случайных величин, распределение которых эволюционирует, причем закон эволюции является непараметрическим.

Рассмотрим подход, при котором используется метод распознавания текущей ситуации как «благоприятной» для входа в рынок на основе усреднения выборочных траекторий нестационарного случайного процесса.

Индикаторы представляют собой определенные функционалы, заданные на фрагментах траектории случайного процесса. Для оценки эмпирической условной вероятности того, что определенный интервал значений индикатора отвечает ожидаемому поведению ряда, требуется сгенерировать набор возможных траекторий временного ряда, выборочная функция распределения которого эволюционирует ожидаемым образом. Затем проверить на сгенерированном наборе траекторий устойчивость срабатывания индикатора.

В качестве таких функционалов (индикаторов), например, можно использовать опционы, а достижение заданной величины доходности – как биржевой индикатор (критерий, при достижении которого осуществляется продажа или покупка актива).

Опционные контракты *call*-опционов $C(t)$ и *put*-опционов $P(t)$ связаны с функцией распределения $p(x, t)$ следующим образом:

$$C(t) = \int_{x_s}^{+\infty} (x - x_s) \cdot p(x, t) dx \text{ и } P(t) = \int_0^{x_s} (x_s - x) \cdot p(x, t) dx,$$

где x_s – цена исполнения опциона (*strike price*), t – дата исполнения (*expiry date*), x – текущая стоимость, $p(x, t)$ – плотность вероятности достижения стоимости x в момент времени t в качестве которой может быть использована восстановленная по некоторой наблюдаемой выборке данных выборочная функция плотности распределения (ВФПР).

В применяемых в настоящее время на практике моделях анализа и прогнозирования динамики нестационарных временных рядов (их эволюции) в качестве аппроксимаций выборочных распределений чаще всего используются диффузионные уравнения, включая нелинейную диффузию [30], уравнение Лиувилля [29], уравнение Фоккера – Планка [29] и ряд других.

Уравнение модели нелинейной диффузии имеет вид:

$$\frac{dp(x, t)}{dt} = D(t) \frac{d^2 p^{\frac{n-1}{n+1}}(x, t)}{dx^2},$$

где n – числовой параметр модели, а $\frac{n-1}{n+1}$ – показатель степени функции плотности распределения $p(x, t)$. Это уравнение учитывает только случайные переходы.

Уравнение Фоккера – Планка имеет вид:

$$\frac{dp(x, t)}{dt} = \frac{D(t)}{2} \frac{d^2 p(x, t)}{dx^2} - \frac{d(U(x, t)p(x, t))}{dx},$$

где $U(x, t)$ – скорость «сноса», $D(t)$ – коэффициент диффузии, и учитывает не только случайное изменение (член уравнения $\frac{d^2 p(x, t)}{dx^2}$), но и упорядоченные нестационарные переходы (член уравнения $\frac{d(U(x, t)p(x, t))}{dx}$) или «нестационарный снос».

Уравнение Лиувилля:

$$\frac{dp(x, t)}{dt} + \frac{d(U(x, t)p(x, t))}{dx} = 0$$

определяет упорядоченный перенос.

Практика показывает, что на самом деле экономические процессы не являются полностью случайным, а имеют тенденцию к самоорганизации, а также на них накладывается возможность влияния памяти о предыдущих состояниях.

3. Моделирование процессов в социотехнических системах (социальные сети) на основе анализа временных рядов

При моделировании процессов в социотехнических системах (например, в социальных сетях) необходим математический аппарат, который позволил бы формализовать характер

данных и привести их к единой шкале измерений. Очевидно, что нельзя в одной модели проводить вычислительные операции, например, над лингвистическими оценками и величинами метрической шкалы без использования процедур отображения на формальное безразмерное множество. Эта проблема имеет исключительную важность, поскольку большинство данных, например, в социальных сетях имеют текстовый формат, и для получения временного ряда, описывающего динамику наблюдаемых процессов с течением времени, необходим их анализ.

В последнее время предпринимается множество попыток создания различных моделей и методов прогнозирования социальных, экономических и политических событий путем анализа текстовой информации и построения на её основе временных рядов. Рассмотрим некоторые методы, которые применяются для анализа плохо структурированной текстовой информации и прогнозирования событий.

В работе [31] для решения задачи анализа авторы изучают временные зависимости в потоках событий и вводят кусочно-постоянную аппроксимацию их интенсивности, применяя Байесовский подход и распределение Пуассона к описанию выборки важности будущих событий. Это позволяет построить нелинейные временные зависимости для предсказания будущих событий с использованием деревьев решений. Однако авторы не рассматривают наличие памяти информационного пространства и возможность его самоорганизации, что является, на наш взгляд, очень важным для прогнозирования редких событий.

В статье [32] на основе анализа текстовых данных и методов машинного обучения авторы разрабатывают модель для прогнозирования катастроф и стихийных бедствий. Они предлагают анализировать исторические данные, извлекать из них шаблоны событий, связанных с различного рода катастрофами и использовать эти шаблоны для машинного обучения в качестве обучающей выборки, а затем прогнозировать будущие катастрофы, используя текущие события. Авторы собрали данные о катастрофах из поисковой системы Google, делая запросы по ключевым словам. Затем текстовые документы, полученные в результате запросов, обрабатываются методами математической лингвистики, и с использованием обученного байесовского классификатора отсеиваются ложные результаты. После сбора данных авторы выполняют их смысловую кластеризацию. Из ключевых слов, по которым генерировались поисковые запросы, строится матрица переходов, а из сгруппированных событий строится матрица наблюдений. Затем обе матрицы подаются на вход скрытой марковской модели для составления прогноза. По мнению авторов, данный подход позволяет предсказывать будущие события и места, в которых эти события произойдут.

В работе [33] авторы также описывают модель прогнозирования будущих событий, путем обобщения конкретных наборов последовательностей произошедших событий, извлечённых из новостей за 22 года с 1986 по 2008 годы. Авторы предполагают, что события в реальном мире генерируются вероятностной моделью, которая так же генерирует новостные сообщения об этих событиях. Сообщения из новостных событий используются для построения модели в форме вероятности $P(ev_j(t + \Delta) | ev_i(t))$ реализации некоторого будущего события ev_j в момент времени $t + \Delta$ и произошедшего события $ev_i(t)$ в момент времени t . Например, модель показывает, что с вероятностью 18% событие о засухе ev_j происходит после события о потопе ev_i . Эта вероятность аппроксимирует связь между двумя произошедшими событиями реального мира.

В работе [34] было исследовано влияние макро-новостей на экономические процессы, в частности на скачки валюты и цен. Используя макроэкономические новости, показывающие конкретные индексы, такие как уровень безработицы в стране, уровень инфляции и т.д., авторы доказали, что 9–15% скачков валюты напрямую связаны с новостями США, что новости об экономике США оказывают негативное влияние на скачки валюты и цен.

Хуанг (Huang) и соавторы в [35] рассмотрели эту проблему, разработав заранее подготовленную модель для информирования инвесторов о важных политических и экономических новостях в реальном времени. Модель основана на взвешенных правилах ассоциации, которые используются для определения того, является ли выпущенная новость достаточно важной для инвесторов. Во время обучения по реальным данным алгоритм взвешенных ассоциативных правил обнаруживает множественные термины, которые часто появляются одновременно в одном заголовке новостей. Интуитивное значение правила ассоциации заключается в том, что заголовки новостей в базе данных, которые содержат набор ключевых слов X , также содержат набор ключевых слов Y . Вес wks для отдельного ключевого слова определяется как

$$wks_p = \frac{\sum jpf_{p,j}}{n},$$

где pf_{pj} обозначает колебание цены закрытия акции на следующий торговый день, и ключевое слово p появляется в заголовке (-ах) новостей на j -ый день, n представляет собой общее количество дней, в которых ключевое слово появляется в заголовках новостей. Таким образом, эти данные помогают решить, влияют ли ключевые слова в заголовках новостей на результат торговли. Модель была откалибрована на реальных данных путем вычисления правил ассоциации весов и построения базы данных весов ключевых слов. Экспериментальные результаты показывают ее выполнимость для анализа новостей в режиме реального времени.

Робертсон (Robertson) и его коллеги исследовали влияние на рынок не-макроэкономических новостей, а также времени суток и процента новостей, когда рынок реагирует наиболее значимо [36]. Они определили гетерогенные временные ряды средней цены акций, объема, количества сделок и собрали данные по каждой минуте в рамках бизнес-дня (от начала до конца торгового периода). Затем был определен временной ряд доходности, использованный для определения периодов высокой доходности, свидетельствующих о реакции рынка на новости. Кроме того, изменение временных рядов объема и изменение временных рядов количества торгов использовались для обнаружения внезапного увеличения объема и количества торгов в качестве индикаторов реакции рынка на новости.

В работе [37] авторы разработали алгоритм обнаружения причинно-следственных связей между событиями в социальных сетях и применяют его для прогнозирования точности и времени реализации событий. Алгоритм основан на поиске и анализе коротких сообщений в Твиттере. Твиттер – это социальная сеть для публичного обмена сообщениями при помощи веб-интерфейса, SMS, средств мгновенного обмена сообщениями или сторонних программ-клиентов для пользователей интернета любого возраста. Пользователи Твиттера публикуют короткие сообщения – твиты, которые могут содержать

фотографии, видео, ссылки и текст. Эти сообщения появляются в профиле пользователя и доступны всем друзьям автора сообщения в социальной сети. Разработанный алгоритм состоит из нескольких шагов. На первом шаге отбираются твиты за определенный период времени, из твитов извлекаются ключевые слова. На втором шаге по ключевым словам определяется тональность извлечённых слов – положительная, отрицательная или нейтральная. Для определения тональности слов используется обученный классификатор на базе метода опорных векторов (SVM). На третьем шаге определяются причинно-следственные связи между ключевыми словами, для этого используется методика обучения ассоциативным правилам (association rule learning), которая извлекает правила «if-then» из данных. На четвертом шаге выполняется прогнозирование событий, на основе результатов временного анализа твитов и причинно-следственных связей, вычисленных на предыдущем шаге.

В работе [38] представлены исследования, посвященные использованию пространственно помеченных твитов, для прогнозирования преступности в масштабе крупного города. Основная гипотеза заключается в том, что местоположение, время и содержание твитов информативны в отношении прогнозирования времени и места появления возможных криминальных событий.

Традиционными методами анализа и визуализации распределения преступлений в городском пространстве и времени являются метод карты горячих точек, вычисляющий двумерную пространственную функцию плотности вероятности для исторического преступления и метод моделирования самовозбуждающихся точечных процессов, фиксирующий пространственно-временную кластеризацию криминальных событий. Ограничениями указанных методов при анализе преступности являются: локальная описательность (неприменимость к различным географическим регионам), требование наличия исторических данных о преступности для интересующего региона, отсутствие учета показателей социального медиа-ландшафт региона.

Для выделения тематик твитов автор предлагает использовать тематическое моделирование, т.е. построение модели коллекции текстовых документов, определяющей к каким темам относится каждый документ коллекции (в данном случае твит). Алгоритм построения тематической модели получает на входе коллекцию текстовых документов. На выходе для каждого документа выдаётся числовой вектор, составленный из оценок степени принадлежности данного документа каждой из тем. Размерность этого вектора, равная числу тем, может либо задаваться на входе, либо определяться моделью автоматически.

Затем проводится токенизация – замена конфиденциального элемента данных на неконфиденциальный эквивалент, называемый токеном, не имеющий самостоятельно смысла/значения для внешнего или внутреннего использования. Токен – это ссылка (т.е. идентификатор), сопоставимый с конфиденциальными данными через систему токенизации. Система токенизации предоставляет приложениям обработки данных полномочия и интерфейсы для запроса токенов или расшифровку конфиденциальных данных из токенов.

Для определения правильной части речи для слова из твита (тегирование части речи) использовался частичный речевой теггер. Его задача – автоматическая обработка текста для определения части речи и грамматических характеристик слов в тексте

(корпусе) с приписыванием им соответствующих тегов. Важную роль в анализе имеют смайлы (стилизованные графические изображения человеческих эмоций). Созданный автором специальный токенизатор распознает смайлы как отдельные токены, несущие в случае твитов семантический контент, описывающий эмоциональное состояние пользователя, и используемые для моделирования тематики твита.

Для проверки результатов прогнозирования автор выделил квадрат на карте города и в течение месяца соотносил предсказанные преступления с реальными данными. На этой выборке был обучен бинарный классификатор. Результаты показали, что использование методов лингвистического анализа и статистического моделирования для автоматического определения популярных городских тем на основе данных из твитов городских жителей и включение собранного списка обсуждаемых тем в модель прогнозирования преступности улучшают эффективность стандартных методов прогнозирования преступности в несколько десятков раз.

Подводя итог, необходимо отметить, что переписка в социальных сетях, например в сети Twitter, является идеальным источником данных для поддержки принятия решений. Пользователи Twitter, исчисляемые миллионами, публично и эмоционально обсуждают актуальные события и темы, создавая контент, бесплатно распространяемый по всему миру в режиме реального времени, в том числе и в виде сообщений (твитов), помеченных точными пространственными и временными координатами. Также выявлено, что одной из главных задач при моделировании процессов в социотехнических системах (например, социальных сетях) является разработка математического аппарата для приведения данных к единой шкале измерений.

4. Моделирование процессов в социальных системах (электоральные кампании) на основе анализа временных рядов

Рассмотрим электоральную кампанию как сложную систему, некую структуру взаимосвязанных объектов, в которых присутствует человеческий фактор, уже в силу своей природы приводящий к нечеткости, неопределенности и недетерминированности характеристик, наблюдаемых в сложных структурах электоральных процессов.

Сложность систем определяется свойством эмерджентности. Возникновение эмерджентности не является итогом простого суммирования показателей характеристик элементов системы, а проявляется в результате возникновения цепочек системных связей и адаптивного перераспределения функций между элементами. Одним из проявлений эмерджентности, например, является самоорганизация и память о предыдущих состояниях, связанная с наличием человеческого фактора [39].

Описывающая электоральный процесс модель должна подразумевать решение задачи прогнозирования. Однако при изучении электоральных процессов не всегда возможно описать изучаемый процесс математически, даже при наличии данных по некоторой характерной наблюдаемой величине. В таких случаях используется подход, основанный на анализе сигналов, производимых сложной системой. При упоминании таких сигналов принято использовать модели на основе временных рядов.

Прогнозирование результатов выборов – относительно недавняя и все более популярная часть социологических и политологических исследований. Конкурентные выборы

являются отличительной чертой современной демократии, и прогнозирование победителя интересует всех участвующих или наблюдающих за ходом избирательной кампании.

Прогнозирование выборов выделяется из других политологических исследований, так как прогноз:

- основан на статистических и оперативных данных, которые характеризуются ограниченностью и недостоверностью;
- ориентирован на временно-ограниченную задачу;
- связан с погрешностью методов измерения исходных данных;
- связан со спецификой проведения избирательной кампании и непосредственно выборов.

Во время проведения избирательной кампании и выборов собирается информация об экономических, социальных, политических условиях жизни электората; выявляется состав основных электоральных слоев и групп, в рамках которых определяются актуальные проблемы, политические и партийные предпочтения избирателей.

Уже в процессе избирательной кампании начинается анализ собранных данных, ищутся тренды дальнейшего развития выборного процесса, делаются попытки управления ходом избирательной кампании. После того как результат выборов становится известным, идет подведение итогов выборов и выявление причин, приведших к успеху или неудаче кандидатов.

Несмотря на то, что во время проведения избирательной кампании и последующего анализа результатов выборов собирается большой объем разнотипных данных, требующих аналитической обработки, активное применение математических методов и основанных на них компьютерных технологий для прогнозирования или оценки результатов выборов до сих пор является в среде социологов и политологов достаточно спорным вопросом. В ходе исследования ВЦИОМ по изучению американских практик электорального прогнозирования с использованием данных опросов общественного мнения [40] были проведены интервью с ведущими специалистами в области электоральных исследований и прогнозирования, в которых участвовали представители Pew Research Center, CBS News, YouGov, Edison Research, SurveyMonkey, Gallup, Wilson Perkins, Allen Opinion Research, Huffington Post, Abt SRBI, SSRS, Langer research associates, Института социально-экономических исследований и политики (ISERP), исследователями Колумбийского, Принстонского и Стэнфордского университетов, отделов поллинга телекомпаний ABC News и CBS News, отдела опросов The Washington Post, а также ряд независимых исследователей, занимающихся электоральным прогнозированием. Результаты интервью показали, что среди американских исследователей электоральных процессов можно выделить четыре группы по типу решаемых задач:

- «публичные» социологи (решение повседневных исследовательских задач широкого профиля),
- партийные социологи (решение социологических задач с учетом партийных интересов),
- академические социологи (работа с агрегированной информацией по выявлению зависимости результата выборов от набора различных индикаторов),
- агрегаторы (исключительно агрегирование социологических данных).

По мнению опрошенных, аналитические модели академических исследователей характерны тем, что рассматривают большое количество индикаторов различной природы,

которые позволяют получать структурные оценки вероятных результатов выборов на основе статистических данных предыдущих выборов [40]. При этом единственным показателем, который получен из текущих опросов общественного мнения, является рейтинг одобрения деятельности настоящего избранника: «по существу берется самый новый рейтинг популярности Президента и прогоняется через статистические модели с временными рядами» [40]. Поэтому полстеры (от английского pollster) – специалисты, которые занимаются подготовкой, проведением и анализом результатов опросов общественного мнения (polls) – редко используют академические модели, считая их больше ретроспективными и «объяснительными», и мало учитывающими текущие настроения электората и специфические условия проведения выборов в том или ином государстве.

Часть российских социологов и политологов разделяют мнение о том, что формализованное математическое описание сложных разнородных стохастических электоральных процессов приводит к сильной примитивизации модели выборного процесса и не дает устойчивого достоверного результата. В Общественной Палате Российской Федерации (ОПРФ) состоялся круглый стол «Математика на службе избирателей», в ходе которого обсуждалась значимость математических исследований в оценке избирательного процесса [41]. Основное внимание было уделено возможности доказательства фальсификации результатов выборов с помощью математических методов (теория Шпилькина). Заместитель Секретаря ОПРФ, руководитель рабочей группы ОПРФ по мониторингу реализации избирательных прав граждан Александр Точенов отметил: «Некие математические методы накладываются на социальные процессы, и мы не получаем подтверждения того, что данные объективны. На мой взгляд, математика в избирательном процессе стала партийной, потому что социальные системы неравномерны, нелинейны, неоднородны. Цифры — это влияние на сознание, а избирательная система должна быть безупречной и достоверной» [41].

Однако, автор работ [42, 43], отмечает, что такие проблемы исследований, как сопряжение заложенной в математическом методе модели с содержанием решаемой социологической задачи и невозможность проверки репрезентативности социологической выборки, относятся скорее к самой методике социологического исследования, и на него не оказывает влияния применение или неприменение математических методов и компьютерных технологий. Далее автор в своих статьях описывает перспективные для социологических исследований математические методы и компьютерные технологии, показывая полезность их применения в данной предметной области. Например, в [42] показана роль методов математического моделирования социальных процессов, масштаб развития которых, по мнению автора, позволяет говорить о них как об относительно автономной ветви науки. В статье [43] тот же автор отмечает, что «для обеспечения эффективной согласованности теоретического и эмпирического этапов исследования требуется, чтобы процесс применения математического аппарата сводился к построению серии таких математических моделей социальной реальности, которые отражали бы теоретические представления социолога об изучаемом явлении. Этому могут способствовать: а) понимание математики не только как строгой формальной науки (традиционная точка зрения), но и как научной ветви, направленной на выработку правил построения модели изучаемой реальности, записанной с помощью математического языка; б) рассмотрение

всех моделей, лежащих в основе математических методов, как результата обобщенного измерения и обеспечение соответствия этих моделей априорным теоретическим представлениям; в) использование определенных методологических принципов применения математического аппарата в социологии». Таким образом, автор делает вывод, что потребности политических и социологических наук в изучении количественной стороны электоральных процессов, а также развитие методов и средств информационных технологий неизбежно приведут к математизации политических и социологических исследований электоральных процессов.

В [40] также отмечается, что, несмотря на специфичность проведения избирательной кампании и выборов в различных государствах, например, в Российской Федерации количество избирателей на последнем этапе выборов существенно больше, чем в США, а количество факторов, влияющих на предпочтения избирателей в России, существенно меньше, чем в Америке. Также можно выделить набор задач, которые являются общими для электоральных прогнозов: поддержание публичности прогноза (т.е. прогноз должен быть опубликован); жёсткое соблюдение методических требований социологических опросов (тип выборки, сроки проведения опроса, процедуры контроля, методика опроса). Общемировой тенденцией является расширение применения новых ИТ-технологий при проведении опросов, создании соответствующих методик сбора и обработки данных, прогнозирования результатов. Поэтому разработка новых математических методов и моделей прогнозирования результата выборов является востребованной задачей.

4.1. Структурные модели

Первые электоральные прогнозы были сделаны в компании Gallup при попытке спрогнозировать президентские выборы в США в 30–40-х годах, потом в течение сорока лет политические партии и отдельные научные группы предлагали прогнозы выборов на основе данных, полученных в ходе собственных предвыборных опросов. В 80-ые годы появились первые модели, использующие регрессионные подходы с учетом экономических и политических индикаторов, предположительно влияющих на популярность кандидатов. В то время наиболее популярным математическим подходом был метод наименьших квадратов, основанный на минимизации суммы квадратов отклонений некоторых функций от искомым переменных [44]. Метод наименьших квадратов является одним из базовых методов регрессионного анализа для оценки неизвестных параметров регрессионных моделей по выборочным данным.

В России одним из первых ученых, работавших в данной области, был А.О. Крыштановский (1955–2005 гг.) – советский и российский социолог, математик, специалист по методикам социологических исследований и анализа социологических данных, первый декан факультета социологии Высшей школы экономики. За 1995–2005 гг. Крыштановским А.О. были опубликованы работы [45–48], посвященные особенностям и возможностям применения математического аппарата временных рядов для анализа и прогнозирования электоральных процессов. Автор отмечал, что применение математического аппарата временных рядов позволит изменить единицу анализа динамики электоральных процессов, перейдя от анализа характеристик отдельного респондента к анализу социальной группы [45, 46]. Был рассмотрен ряд вопросов, возникающих при смене едини-

цы анализа с отдельного респондента на социальную группу. Первый – это построение индикаторов, характеризующих новую единицу анализа – социальную группу. Если рассматривать, например, средний возраст социальной группы, то данный индикатор можно получить простым усреднением возрастов респондентов. В других случаях задача не является настолько тривиальной и требует отдельного рассмотрения [45]. Второй вопрос – наличие неодинаковых интервалов времени между опросами. В приведенных исследованиях интервал составлял один-два месяца, поэтому нарушение требования равенства временных интервалов было устранено путем удаления части результатов исследований в данных мониторинга, а интервал установлен равным двум месяцам. Для исследований была использована традиционная формула представления временного ряда, где значение анализируемого показателя считается как сумма значения тренда (плавно меняющегося, нециклического компонента, описывающего чистое влияние долговременных факторов, эффект которых сказывается постепенно), сезонного компонента, описывающего регулярные изменения в течении заданного периода (года, месяца, недели и т.п., последовательность циклов предполагается почти точно повторяющейся), циклического компонента, описывающего длительные периоды подъемов и спадов (сами циклы могут меняться по протяженности и амплитуде) и ошибки (отклонения реальных данных от суммы первых трех закономерных составляющих). Далее автор, используя методы регрессионного анализа, рассматривал выделение обобщенных показателей для каждого из опросов, например, показатель среднедушевого дохода.

Крыштановский А.О., как и большинство авторов структурных моделей электорального прогнозирования, ставил результат выборов в линейную зависимость от результатов опросов и влияния экономических (безработица, инфляция, рост национального дохода) или внеэкономических (популярность кандидата, степень партийной поддержки претендента, роль личного фактора) индикаторов с учетом погрешности рассматриваемых показателей. Разумеется, что в различных политических системах на активность избирателей влияют самые различные факторы. В США, например, уровень активности избирателей, более всего зависит от уровня образования, пола, возраста, политического интереса. Например, в [49] описано изменение политических предпочтений (поляризация взглядов) врачей в Соединенных Штатах во время кампаний на федеральных выборах с 1991 по 2012 год и их финансовых вкладов в фонды республиканцев и демократов в зависимости от пола и врачебной специализации. В частности, общий объем взносов увеличился с \$20 млн. (в 1991 году) до \$189 млн. (2012 год), а доля врачей, делающих взносы, – с 2.6% до 9.4%. Взносы в фонд республиканцев были более распространены среди мужчин, чем среди женщин (52.3% против 23.6%). Врачи, практикующие в государственном секторе, составили 53,2% от всех делавших взносы, а частном – 25.6%; хирурги – 70.2%, педиатры – 22.1% и т.д. Общий вывод, который был сделан авторами работы [45] на основании представленных ими данных, заключается в том, что в период с 1991 по 2012 год политические предпочтения американских врачей сместились от республиканцев в сторону демократов. Однако причины такого изменения проанализированы не были.

В работе [50] авторы описали динамику изменения предпочтений избирателей в Конгресс США на промежуточных выборах 2010 года. Исследования показали снижение поддержки кандидатов от демократов по отношению к республиканцам на завершающем

этапе кампании (отметим, что тоже самое произошло при выборе президента США в 2016 году – Трамп обошел Клинтон). На основе описанной динамики автор [50] сделал вывод, что данные изменения связаны с колебаниями в утверждениях Обамы, ухудшением национальных экономических условий и правительственной реформой здравоохранения.

В Италии и Австрии такие характеристики как образование, пол, возраст, политический интерес практически не влияют на выбор. В Англии, Германии, Швейцарии, Нидерландах на уровень активности также не оказывают влияния ни образование, ни пол [44].

В исследованиях российских специалистов большое место занимают вопросы политической культуры и ее влияния на активность избирателей. Например, в [51] авторы предложили следующий методологический подход к определению основных тенденций электоральных предпочтений российских избирателей. На первом этапе были выделены наиболее значимые параметры, на основе которых могут формироваться электоральные предпочтения. Это – место проживания (принадлежность к определенной электоральной географии), динамика экономического благосостояния, протестные настроения, категории населения (возраст/пол/трудовой статус и др.). К дополнительным значимым параметрам были отнесены: влияние региональных средств массовой информации (СМИ), динамика политических предпочтений (статистика ВЦИОМ), работа партий в регионах, влияние ошибок участковых избирательных комиссий (УИК) на достоверность информации, влияние административного ресурса, вид выборов (регион/местные/федеральные и партии/персоналии).

Затем для проверки адекватности предположения о влиянии различных индикаторов на модели был выполнен анализ статистических данных протоколов УИК. Поскольку данными социологических опросов авторы не располагали, то были взяты данные протоколов УИК 25 регионов европейской части РФ по выборам Президента РФ 2 марта 2008 года. На территории этих регионов численность электората составила 22 223 670 человек, что составляет около 21% избирателей страны, количество УИК – 22 318 (примерно 23% УИК). Был сделан вывод о верности гипотезы о неоднородности множества избирателей. Подтверждена независимость распределений по независимым параметрам (например, зависимость количества УИК от явки избирателей) на однородных подмножествах избирателей. Отмечена необходимость сравнения расчетных данных по модели с реальными данными электоральной статистики.

Структурные модели отличаются друг от друга, в основном, оценками политических и экономических показателей. Например, прогнозируя лидера на президентских выборах во Франции в 2012 году, авторы [52] оценивали функцию голосования на основе данных о местных и национальных выборах с 1981 по 2007 годы и политических факторах. Окончательное прогнозирование победителя на данном политическом фоне определялось отслеживанием изменения экономических факторов (безработица). В результате был дан прогноз на поражение Н. Саркози.

К экономическим факторам также часто относят изменения в ВВП на душу населения, инфляцию и безработицу, рост реальных доходов и субъективные убеждения избирателей в экономических показателях правительства. Зависимость прогноза победителя от изменения этих факторов считалась линейной. Например, в [53] показано, что на конечный выбор избирателя влияют не совокупные успехи экономической политики за

весь срок правления, а результаты последнего года перед выборами, что скорее относится к области психологии, а не социологии и политологии.

В работе [54] для описания изменения предпочтений избирателей во время выборов президента в Ирландии в 1997 году использовалась модель смешанного членства в разных группах. Согласно этой модели один и тот же человек может быть одновременно отнесен к группам с разными взглядами, т.е. не имеет четко выраженных предпочтений.

Коэффициенты, используемые в структурных моделях при оценке экономических и политических переменных, генерируются путем применения прогнозной модели к как можно большему количеству прошедших выборов, чтобы узнать, какое влияние эти переменные оказали в прошлом. Таким образом, прогнозирование следующих результатов обеспечивается добавлением соответствующих значений коэффициентов для политических и экономических показателей в том виде, в каком они находятся в год выборов, а затем умножением их на коэффициенты, которые, как говорят нам предыдущие выборы, обеспечивают наилучшее соответствие.

Впервые модель влияния экономики на результаты выборов разработал Рэй Фэйр (Ray Fair), профессор экономики Йельского Университета (Yale University), в 1980-е годы [55]. Были выделены два базовых фактора, влияющие на результат выборов: темпы роста или снижения валового внутреннего продукта США в течение трех кварталов перед днем голосования (выборы в США традиционно проводятся в первый вторник ноября) и средний уровень инфляции на протяжении предыдущих 15-ти кварталов. Модель Фэйра позволила точно предсказать результаты пяти из прошедших семи президентских выборов – 1980, 1984, 1988, 2000 и 2004 годов.

Известный политолог Даглас Хиббс (Douglas Hibbs) в 2000 году предложил иную модель, назвав ее «Хлеб и Мир» (Bread and Peace). Базовыми показателями модели были выбраны:

- среднестатистический темп роста/снижения чистого дохода на душу населения в течение четырех лет, предшествующих президентским выборам (президентская каденция длится четыре года), т.е. повышение реального дохода на 0.01% приводит к увеличению числа голосов избирателей, отданных за правящую партию, на 0.36% (этот прирост возможен только в том случае, если рейтинг правящей партии составляет не менее 46%);
- количество американских солдат, погибших в иностранных войнах (особенно в Корее и Вьетнаме). По расчетам Хиббса, каждая тысяча убитых американских солдат отбрасывает у правящей партии 0.3% голосов.

Модель Хиббса была подтверждена результатами 12 из 14 выборов, прошедших в период с 1996 по 2000 год. В 2004 году она также позволила верно определить победителя.

Автор работы [49] утверждает, что эти две вышеописанные структурные модели имеют преимущество перед опросным прогнозированием, т.к. информация, необходимая для прогноза, доступна до следующих выборов, и сами модели основываются на оценке данных, которые действительно важны для избирателей, иначе прогноз будет неверным.

Существенным фактором, препятствующим возможности прогнозирования исхода избирательных кампаний, является большая волатильность предпочтений избирателей. В работе [56] для возможного прогнозирования итогов голосований и снижения волатильности предлагается методика использования в опросах вопросов типа «скорее все-

го». По мнению авторов работы [56], значительная часть изменения социологических данных о предпочтениях избирателями кандидатов определяется не реальными сдвигами избирателей в предпочтении, а скорее всего изменениями в составе вероятного пула избирателей. А вопросы типа «скорее всего» могут позволить разделить реальные изменения предпочтений избирателей и изменения их пулов (изменения мнения данного избирателя, от его замены в выборке на другого человека, т.к. исследования являются обезличенными).

Волатильность предпочтений избирателей и влияние политической искушенности на их окончательное электоральное решение во время региональных выборов в Бельгии в 2009 году было изучено в работе [57]. Рассмотрены причины и мотивы изменения предпочтений. Результаты показывают, что избиратели с низким уровнем политической эффективности (понимания программ кандидатов и партий и интересом к ним), как правило, чаще меняют свои предпочтения, как в рамках одной кампании, так и между выборами. Избиратели с более высоким уровнем интереса к политике переключили свои намерения до начала кампании. Это в значительной степени определяет волатильность.

Обзор моделей выбора предпочтений при голосовании и избирательной политики представлен в работе [58]. В ней обсуждаются два класса моделей: те, в которых выборы рассматриваются с позиции агрегации предпочтений, и те, которые смотрят на выборы, исходя из механизмов агрегации информации. Модели первого класса, как правило, учитывают общее изменение с течением времени доли избирателей (являются феноменологическими, не связывают изменения и вызывающие их причины) с определенными предпочтениями, а модели второго класса учитывают влияние общего количества информации о кандидатах или партиях на избирателей во время выборов (частично связывают изменения с вызывающими их причинами). Кроме того, по мнению авторов работы, необходимо учитывать роль асимметрии информации (политики лучше информированы о политике, чем избиратели, что позволяет им предпринимать скрытые действия).

Необходимо отметить, что существенную роль на предпочтения избирателей оказывает информационное пространство (телевидение, пресса, интернет, социальные сети и т.д.). В частности, в работе [59] рассматривается роль воздействия на предпочтения избирателей средств массовой информации в бразильских президентских кампаниях 2002 и 2006 годов. В этой работе учитывались следующие факторы: общая партийная пропаганда кандидатов, время свободных публичных выступлений кандидатов, освещение их деятельности комментаторами. В своей работе P.S. Mundim делает вывод, что партийная пропаганда и выступления самих кандидатов оказало большее воздействие на результаты выборов в Бразилии, чем освещение их деятельности комментаторами.

4.2. Опросные модели

Опросы общественного мнения уже давно играют важную роль в изучении и проведении выборов. В работе [60] подробно описана история проведения и использования результатов опросов для прогнозирования результатов выборов, понимания поведения избирателей и планирования стратегии избирательной кампании. Автор рассматривает опросы как базовый инструмент, который ученые и журналисты используют для понимания поведения избирателей. В последнее десятилетие отмечается, с одной стороны, ко-

личественный рост опросов и изменение средств проведения опросов: активное использование интернет-опросов, опросов при помощи мобильных телефонов, интерактивных голосовых ответов (IVR); с другой стороны, отмечено снижение качества данных из-за методологических ошибок обработки собранной информации. Последнее затрудняет использование данных опросов при составлении избирательных прогнозов. Также автор прослеживает тенденцию дополнения данных опросов различными методами и моделями. Тем не менее, опросы являются неотъемлемой частью политических избирательных кампаний. Давний скептицизм в отношении того, что респонденты могут сказать что-либо о мнениях миллионов, уступил место вере в научную основу вероятностных выборок. Неперспективные выборки – как правило, выборочные интернет-опросы – становятся все более распространенными, а вероятностные выборки сталкиваются с серьезными методологическими проблемами, такими как увеличение числа респондентов, нежелающих принять участие в опросе или имеющих только мобильные телефоны.

Информационные технологии предложили новые инструменты проведения опросов. Сегодня опросы общественного мнения распространены не только в преддверии выборов, но и на протяжении всего избирательного цикла, охватывают большее число респондентов. Однако вопрос достоверности полученных данных, корректности агрегирования данных остается актуальным.

В работе [61] отмечается, что в 2016 году социологи накануне общенациональных президентских выборов провели более 400 опросов, в среднем около двух в день. Каждый выпуск опросов пристально изучался и комментировался представителями средств массовой информации. Однако, как считает автор статьи, несмотря на сфокусированность внимания прессы на результатах опросов и увеличение количества опросов, сама модель политического опроса осталась той же, что была до появления интернета. Главный фактор достоверности результата – это методика проведения опроса. Автор отмечает, что до широкого использования идентификатора вызывающего абонента телефонные опросы проводились намного проще. В 1997 году для национальной выборки из примерно 800 респондентов требовалось от 2000 до 2500 звонков. Сегодня, чтобы получить такое же количество респондентов, требуется от 7500 до 9000 звонков, чтобы получить образец разумного размера, что является резким снижением доли ответивших. Это приводит к тому, что выборка фактически не отражает группу, которую пытается измерить опрос.

Автор [61] отмечает удивительность того факта, что для того, чтобы оценить предпочтения населения страны, достаточно опросить всего 800 людей. Но этот факт подтверждается, если 800 человек действительно выбраны случайным образом. В качестве подтверждающего примера рассмотрена ситуация после провальных для Б. Обамы его первых дебатов против М. Ромни в 2012 году, когда избиратели-демократы просто стали реже отвечать на опросы, поскольку они просто не хотели говорить о политике, в то время как республиканцы повысили свою активность. В итоге результаты опроса сместились в сторону М. Ромни, хотя его реальная поддержка не увеличилась: просто выборки были предвзяты по отношению к избирателям М. Ромни.

Для достижения случайности выборки при наиболее достоверных телефонных опросах опросчикам приходится увеличить количество звонков до семи или более попыток на одного человека. Несмотря на эти усилия по получению случайной выборки, показатели

отклика остаются низкими среди представителей молодежи, говорящих на испанском языке, евангелистов и афроамериканцев [61]. Чтобы исправить этот тип смещения результатов опросов, опросчики используют взвешивание. Например, взвешивание выполняют тогда, когда 6% выборки составляют афроамериканцы, а доля афроамериканцев составляет 12% населения США. Автор считает, что применение процедуры взвешивания на основе известных демографических факторов (раса, возраст и пол) – это уже искусство, а не наука, так как социологи не могут быть уверены, что члены группы, к которой обратились, представляют группу в целом, и их ответы поддержат недостающие проценты участников группы. Например, большинство политических опросов проводится только на английском языке, чтобы избежать острых проблем перевода и более высоких зарплат двуязычных интервьюеров, но 73% латиноамериканцев говорят на испанском языке дома, поэтому выборка латиноамериканцев, достигнутая большинством опросов, не репрезентативна для всех латиноамериканцев.

Также нет полного согласия относительно того, можно ли взвешивать политические факторы: если в опросе доля демократов или республиканцев невелика, следует ли использовать взвешивание, чтобы исправить это? Подобные решения дают некоторым опросчикам возможность сдвигать свои результаты в ту или иную сторону, чтобы избежать слишком большого отклонения от результатов других опросов. Поскольку средние результаты опросов стали более доступными и распространёнными, некоторые исследователи не публикуют свои результаты опросов, если их результаты отличны от средних значений опросов, либо используют стратегическое взвешивание, чтобы вернуть свои опросные результаты к средним значениям опросов. В итоге таких манипуляций исследователи могут пропустить сдвиги в общественном мнении, выявляемые опросами. Лучшие телефонные интервьюеры имеют большой опыт работы и высшее образование, и их оплата – главная стоимость политических опросов. Поэтому попытки автоматизировать этот процесс, чтобы сэкономить деньги, используя интерактивные голосовые ответы (IVR), при котором интервьюеры в режиме реального времени заменяются записанными подсказками, а респонденты дают ответы, разговаривая с компьютером, вполне понятны. Эти услуги значительно ускоряют и удешевляют опрос: они могут заполнить его за несколько часов и стоить примерно 1/10 от стоимости живых интервьюеров. Однако, IVR-опросы имеют более низкие показатели отклика, чем традиционные выборки телефонов, способствуют большему количеству ложных ответов, не могут легально связаться с сотовыми телефонами. Также есть категории избирателей, при опросе которых использование IVR-опросов бесполезно.

Онлайн-опросы еще более дешевые и быстрые по сравнению с традиционными телефонными опросами, но 16% американцев не пользуются интернетом, что требует дополнительного уровня взвешивания, чтобы попытаться приблизиться к репрезентативной выборке общественности [61]. Чтобы обойти этот факт приходится предварительно звонить и договариваться с респондентом о том, что он пройдет онлайн-опрос. Это увеличивает стоимость и требует применения еще более сложного взвешивания, чтобы исправить тот факт, что результаты опросы повторно отбираются из результатов других опросов. Недавние исследования показывают, что даже после взвешивания онлайн-опросы, как правило, преувеличивают долю мужчин и безработных, возможно, потому, что

онлайн-опросы обычно требуют от людей выбора, а у безработных мужчин может быть больше мотивации делиться своими взглядами и с большей вероятностью иметь время для опроса. Это может помочь объяснить, почему Дональд Трамп, кажется, добивается большего успеха в онлайн-опросах, чем в телефонных опросах. Таким образом, традиционные телефонные опросы в режиме реального времени, по мнению автора [61], дают более точные результаты, чем альтернативные варианты.

Много исследований посвящено повышению достоверности агрегирования данных опросов. В статье [62] на основе опросов, полученных во время президентских выборов в США до 2016 года, была выполнена оценка эффективности агрегирования опросов с основных веб-сайтов с прогнозом. Было установлено, что незначительная погрешность данных, возникшая из-за поправок, внесенных в данные по партийным предпочтениям, оказала существенное влияние на результат прогноза на уровне штата. Авторами предложена новая модель сглаживания подобных эффектов, показавшая аналогичные или превосходящие результаты по сравнению с другими методами агрегации на нескольких выборах. Улучшение предложенной модели по сравнению с конкурирующими методами было особенно значительным в 2016 году из-за колебаний избирателей в поддержке кандидатов. Авторы [58] считают, что усиление акцента на фундаментальных статистических компромиссах смещения и дисперсии поможет в дальнейшем улучшить прогноз.

В статье [63] отмечается, что авторы за пять последних президентских выборов в США публиковали результаты прогнозирования, базирующихся на двух параметрах. Первый – результат опросов, второй – средневзвешенное значение квартального роста в LEI (Индекс ведущих экономических показателей), где каждое текущее квартальное значение взвешивается в 0.80 раза больше, чем в следующем квартале. Оценивался совокупный взвешенный рост ведущих показателей в тринадцатом квартале избирательного цикла, первом квартале года выборов (далее – совокупный рост LEI). Измеренный в 13 квартале совокупный рост LEI отражает как экономические изменения, произошедшие в течение избирательного цикла, так и ожидаемые – на оставшуюся часть года выборов. Совокупный рост LEI является опережающим экономическим показателем и, по мнению авторов, хорошо отражает экономические тенденции по мере приближения выборов и может быть измерен заранее. Соответственно, прогнозная модель авторов, основанная на опросах, проведенных в пробном периоде, и совокупном росте ведущих экономических показателей, предсказала в 2016 году победу Х. Клинтон над Д. Трампом.

В отчете Специального комитета по выборам в США 2016 года «Оценка выборов 2016 года в США», опубликованном Американской ассоциацией изучения общественного мнения [64], подробно разобраны причины несовпадения результатов опросов и прогнозов победителя президентской кампании с результатом выборов. Отмечено, что предварительные опросы отдавали предпочтение победе Х. Клинтон с вероятностью 90%, а оценки колебались от 71% до более 99%. В отчете представлены результаты анализа комитетом методов проведения и содержания предвыборных опросов в 2016 году, их сравнение с результатами предыдущих выборов и степень изменения результатов в зависимости от структуры опроса. Также были рассмотрены возможные причины расхождений, заявлены поздние колебания в предпочтениях избирателей по отношению к Д. Трампу и повсеместный сдвиг опросов к мнению выпускников колледжей, отдающих

свои голоса Х. Клинтон. Еще в качестве одной из причин рассматривают изменение явки избирателей, которая благоприятствовала победе Д. Трампа. В качестве системной ошибки при опросах отмечена неточность вероятной модели избирателей – основной причины систематической ошибки при опросе.

Модель, позволяющая просчитать победителя не среди двух участников, а предсказать победителя выборов в условиях многопартийной системы предложена в статье [44]. В качестве примера выбраны Германия (не меньше 6 партий) и Швеция (8 партий), где выборы традиционно являются многопартийными, и где модель прогнозирования результатов выбора, по мнению автора, не может быть чисто структурной моделью, т.е. учитывать большую долю голосов избирателей, как зависимую переменную, а экономические и политические показатели – как объяснительные переменные. Модель прогнозирования победителя многопартийных выборов должна включать данные опросов избирателей, и сделать это можно через динамическую линейную модель, принадлежащую общему семейству моделей пространственных состояний. Скрытая тенденция популярности поддержки оценивается путем объединения результатов опроса во временные ряды посредством фильтрации Калмана. Прогноз выборов затем делается путем экстраполяции этой тенденции на будущее.

В работе [65] на основе опросов общественного мнения в Великобритании представлены следующие методы прогнозирования мест в парламенте:

- корректировка и агрегирование опубликованных данных о намерениях избирателей по различным опросам;
- прогнозирование того, как общественное мнение может измениться до дня выборов;
- прогнозирование общего числа мест на основе прогнозируемых долей голосов в день выборов.

Авторами рассмотрена модель пространства-состояния для опросов общественного мнения, которая корректирует «домашние эффекты» и другие источники ошибок опроса, оценку исторических взаимосвязей между опросами и долей голосов в день выборов, а также вероятностный подход к прогнозированию победителя для каждого избирательного округа.

Автор статьи [66] представляет динамическую байесовскую модель, позволяющую прогнозировать результаты президентских выборов в США на государственном уровне. Предлагаемый метод на основе системного анализа объединяет информацию из исторических моделей прогнозирования в режиме реального времени с результатами большого количества опросов общественного мнения на уровне штатов, которые публикуются в ходе кампании. Результатом является набор прогнозов, точность которых изначально соответствует точности исторической модели, а затем постоянно улучшается на основе текущих данных. Автор на основе иерархической спецификации сглаживает временные и географические ограничения модели, параллельно используя и случайные тесты, подходящие по временным условиям. Таким образом, построенная модель отфильтровывает ежедневные колебания в опросах из-за ошибки выборки и эффектов национальной кампании, что позволяет ежедневно отслеживать предпочтения избирателей по отношению к кандидатам в президенты на государственном и национальном уровнях. Методы моделирования используются для оценки вероятности победы кандидатов в каждом шта-

те и, следовательно, большинства голосов в Коллегии выборщиков. Экспериментальная проверка выполнена в ходе предвыборных опросов в ходе президентской кампании 2008 года, и прогноз победы Б. Обамы оказался верным.

В работе [67] на основе данных с 12 000 уникальных опросов граждан Испании и разработанных байесовских моделей для объединения опросов подтверждено мнение, что анализ результатов текущих опросов населения может стать основой для определения времени выборов и сроков принятия мер по популяризации действий правительства.

В работе [68] авторы предлагают математическую модель оценки потенциальной границы неопределившихся в решении за кого голосовать избирателей штата на федеральных выборах в США, характеризующихся наличием двухпартийной системы и соответственно предполагающим выбор одного из двух. Предлагаемая модель позволяет оценивать разницу в голосовании даже при отсутствии каких-либо статистических данных, основываясь только на экспертных оценках чисел. На основе предлагаемой модели нахождение рассматриваемой оценки сводится к нахождению максимин функции разности двух билинейных функций с одним и тем же первым векторным аргументом, вторые векторные аргументы которого принадлежат многограннику связанных переменных (стратегий кандидатов), и этот минимум ищется на другом многограннике. При определенных естественных предположениях это ожидание математически описывается нелинейной функцией на многограннике из связанных переменных, которые являются стратегиями кандидатов. Хотя нахождение значения этого ожидания может представлять вычислительные трудности, структура этой функции такова, что нахождение наилучшей гарантированной нижней оценки значения этого ожидания для конкретного кандидата от основной партии сводится к решению вспомогательной задачи квадратичного программирования специального состава. Это позволяет формулировать и решать масштабные задачи планирования, связанные с мобилизацией избирателей, не участвующих в голосовании, поскольку квадратичное программирование является одним из наиболее мощных методов математического программирования, и также доступно хорошо разработанное программное обеспечение, реализующее эти методы.

В итоге можно отметить, что структурные модели опираются на опросные данные, поэтому точность их прогнозов зависит не только от используемых математических методов, но и от качества опросных данных. Прогнозы, использующие опросы, варьируются от более упрощенных взвешенных средних значений опроса (агрегирование опросов с учетом размера опроса) до некоторых очень сложных динамических линейных моделей.

4.3. Гибридные модели

В [69] предлагается «Модель канцлера» для прогноза результата выборов в Бундестаг Германии. «Модель канцлера» учитывает комплексное влияние на результат выборов долгосрочных, краткосрочных и среднесрочных факторов. Учитываются три параметра:

- популярность действующего канцлера;
- долгосрочный баланс сторонников партии в немецком электорате, которые официально в партии не состоят (так называемых партизан);
- расходы действующего правительства.

«Модель канцлера» прогнозирует долю голосов правящих партий, находящихся в

коалиции. Как правило, двух партий: социал-демократы и зеленые; или христианские демократы и свободные демократы. Коалиция для большего числа партий не рассматривается. Коэффициенты параметров прогноза (предикторов) оцениваются, начиная с выборов с 1949 г. и по настоящее время. Первое тестирование «Модель канцлера» прошла на выборах 2002 года, затем в 2005 и 2008 годах, и все прогнозы были точными. Несмотря на достигнутые положительные результаты, в среде социологов и политиков сохраняется недоверие к предлагаемой модели, так как она является «академической» и во многом повторяет аналогичные варианты для американских выборов. Однако созданные авторами прогнозные методы не копируют американские. «Модель канцлера» учитывает цикличность прихода в правительство одних и тех же партий, которые заключают между собой достаточно постоянные коалиции для формирования правительства, следовательно, учитывается влияние не одной партии, а коалиции. Также авторы оценивают и влияние краткосрочных факторов, например, удовлетворение общества работой действующего правительства. Прогноз моделей для выборов в США обычно учитывает этот фактор, опираясь на показатели экономической эффективности и популярность президента. В прогнозных немецких моделях в качестве краткосрочных факторов учитывают экономические предикторы: безработица, дефицит бюджета, а не популярность партии или канцлера. Авторы «Модели канцлера» в качестве определяющего фактора учитывают только популярность канцлера. Это подтвердили и предварительные тесты, выполненные авторами «Модели канцлера», показавшие отсутствие ощутимого влияния при включении в оценку экономических факторов, таких как экономический рост, безработица или инфляция. Популярность канцлера является главным и единственным предиктором. Подобная специфика проведения парламентских выборов характерна для Германии. Традиционно в прогнозных моделях имеется только один победитель. В «Модели канцлера» для победы правящей партии необходима коалиция. Авторы [69] считают, что в идеале прогнозная модель результата выборов в многопартийной системе должна прогнозировать доли голосов для каждой из сторон, но создать такую модель сложно и не очень рентабельно, поэтому авторы сделали акцент рассмотрения на правящих партиях, что повышает точность получаемых прогнозов. Если правящие партии набирают достаточно голосов на выборах, чтобы получить большинство мест в бундестаге, они выигрывают избрание и пребывание в должности. Если нет, то можно рассмотреть другие комбинации коалиций. Необходимо определить «достаточную» долю голосов для победы на выборах, так как пропорциональность голосов определяет места партии на выборах при условии, что партия имеет более пяти процентов национального голосования. Чем больше объединенный пул «потраченных впустую» голосов, тем ниже требование на долю голосования меньше 50% для обеспечения большинства мест, т.е. недостаточно «выиграть битву», так как это не дает гарантии «управления».

Авторы [70] предложили методику прогнозирования результатов выборов, сочетающую структурную модель с постоянным агрегированием результатов опросов. Основой структурной модели является байесовская иерархическая структура, обобщающая данные на трех уровнях: районном, региональном и национальном. Далее авторы используют байесовскую стратегию, чтобы добавить в структурную модель результаты последних опросов. Таким образом, появляется возможность учета влияния партий с небольшими историче-

скими данными, в том числе и для партий, участвующих в выборах впервые. Предлагаемая модель опробована на результатах выборов в Конгресс Испании 2015 года, когда две новые политические партии получили 30% голосов. И такая ситуация становится все более привычной для Европы после 2008 года. Научный подход к прогнозированию выборов основан на статистическом моделировании, использовании опросов о намерениях голосования или симпатиях выборщиков, использовании рынков политического прогнозирования на основе ставок для кандидатов. Новизна предлагаемой модели заключается в ее адаптации к ситуациям, когда недостаточно исторических данных для применения гибридных методов. В этом случае результаты выборов определяются местами, выигранными на местном уровне. В среднем по стране, это дает предсказание представительства партии в парламенте. Описанный подход заключается в том, чтобы получить средний показатель популярности по стране для каждой партии и определить, как этот национальный показатель переходит на региональный и городской уровни. Для того чтобы иметь дело с небольшими (или отсутствующими) историческими данными используется структурная модель намерения голосования, обученная на «глубоких» данных, полученных в предвыборных опросах. В Испании они выполняются финансируемым правительством исследовательским центром СНГ и позволяют оценить взаимосвязь между географическими и демографическими характеристиками и выбором избирателей. Недостатком этих наборов данных является то, что размер выборки в некоторых регионах очень низкий, и образец может быть не репрезентативным. Авторы [70] решают эту проблему, используя данные переписи населения. Описанная модель синтезирована с моделью опроса, эффективно вычисляющей средние значения опубликованных опросов и исправляющей потенциальные источники предвзятости, такие как различное качество методологий опроса, а также изменение временных промежутков опросов по мере приближения даты выборов. Из-за отсутствия длинных исторических данных синтез выполняется на основе байесовского подхода синтеза доказательств.

Таким образом, фундаментальная модель производит моделирование локальных результатов для каждой партии; затем полученные результаты преобразуются в количество возможных выборных мест на уровне региона или города (локальные результаты). Локальные результаты агрегируются на национальном уровне для каждого моделирования; получают вес, соответствующий тому, как близко подразумеваемый средний национальный показатель соответствует прогнозируемым моделям опросов. Строятся распределения мест в парламенте. Каждому предполагаемому общенациональному распределению мест присваивается вес и средневзвешенные значения рассчитываются для формирования прогнозов. Структурная модель и модель опроса являются многоуровневыми регрессионными моделями.

4.4. Выводы

Электоральные процессы, играющие исключительно важную роль в динамике развития общественных систем с демократической формой правления, относятся к числу наиболее сложных общественных процессов. Особенностью электоральных процессов являются устойчивая пространственно-временная регулярность (выборы происходят через определенный промежуток времени на фиксированной территории, имеющей более или менее сложившуюся структуру избирательных округов) и одновременное участие в них больших социально различных групп населения с широким спектром социологических параметров.

Последнее приводит к тому, что объективным фактором, определяющим характер и результат электоральных процессов, является статистический, связанный с действием больших групп населения, а к субъективному фактору можно отнести сознательную деятельность участвующих в выборах людей. Статистический фактор поддается анализу и может быть использован для количественного прогноза, а субъективный вносит стохастичность и непредсказуемость в выполнение и результат электорального процесса. Поэтому на сегодняшний день нет общепризнанной методики анализа и прогнозирования электоральных процессов. Построено множество моделей, объясняющих развитие электоральных процессов «задним числом», после того, как выборы прошли, и результат известен. Прогноз предполагает положения, явно коррелирующие с теми событиями, которые будут наблюдаться на практике после его составления. В этом расхождение между целями прогнозирования «академиков» и «партийных аналитиков». Первые дают качественные прогнозы изменения тренда, вторым нужны количественные результаты. Наиболее успешными являются модели, сочетающие традиционные методы анализа временных рядов с методами, учитывающими особенности человеческого фактора – возможности самоорганизации и наличие памяти о предыдущих состояниях системы.

Заключение

В представленном литературном обзоре описаны направления перспективных исследований в области анализа и моделирования временных рядов для описания процессов в сложных экономических, социотехнических и социальных системах.

На основе проведенного анализа рассмотрены достоинства и недостатки существующих моделей и методов.

Это позволило сделать вывод, что для описания процессов в сложных системах с наличием человеческого фактора необходимо разрабатывать и использовать методы и инструментальные средства учета возможности самоорганизации человеческих групп и наличия памяти о предыдущих состояниях системы.

Литература:

1. Авзалова Э.И. Интернет-коммуникации в избирательной кампании США. *Известия Иркутского государственного университета. Серия «Политология. Религиоведение»*. 2017;22:185-194.
2. Курс Д. Парламентские выборы в Израиле 2015 г.: причины, результаты и тенденции. 8 июня 2015. Институт Ближнего Востока. [Электронный ресурс]: режим доступа – свободный (дата обращения: 14.11.2019). URL: <http://www.iimes.ru/?p=24736>
3. Родин А. Небесная сеть: почему новый проект Маска — вызов для России. 17 февраля 2018 г. РБК. Мнение. [Электронный ресурс]: режим доступа – свободный (дата обращения: 14.11.2019). URL: https://www.rbc.ru/opinions/technology_and_media/17/02/2018/5a86a1559a79473fe79a5813
4. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление: пер. с англ. М.: Мир, 1974. 248 с.
5. Льюис К.Д. Методы прогнозирования экономических показателей: пер. с англ. М.: Финансы и статистика, 1986. 130 с.
6. Боровков А.А. Математическая статистика. М.: Физматлит, 2007. 704 с. ISBN 978-5-94052-141-X
7. Кендалл М., Стюарт А. Статистические выводы и связи: пер. с англ. М.: Наука, 1973. 900 с.
8. Кендалл М., Стюарт А. Многомерный статистический анализ и временные ряды: пер. с англ. М.: Наука, 1976. 736 с.
9. Уилкс С. Математическая статистика: пер. с англ. М.: Наука, 1967. 632 с.
10. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. М.: Физматлит, 2006. 816 с. ISBN 5-9221-0707-0
11. Каган А.М., Линник Ю.В., Рао С.Р. Характеризационные задачи математической статистики. М.: Наука, 1972. 248 с.

12. Foster F.G., Stuart A. A distribution-free test in time series dated on the breaking of records. *JRSS.* 1954;B16(1):1-22. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1954.tb00143.x>
13. Орлов Ю.Н., Шагов Д.О. Индикативные статистики для нестационарных временных рядов. Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2011;053:20.
14. Гнеденко Б.В. Курс теории вероятностей. М.: Физматлит, 1961. 406 с.
15. Шугай Ю.С. Нейросетевые алгоритмы прогнозирования событий и поиска предвестников в многомерных временных рядах. Искусственный интеллект. 2004;2:211–215.
16. Ермаков С.М. Метод Монте-Карло и смежные вопросы. М.: Наука, 1975. 471 с.
17. Ермаков С.М., Михайлов Г.А. Статистическое моделирование. М.: Наука, 1982. 296 с.
18. Кожевников А.С. Программное обеспечение для статистического моделирования и анализа случайных процессов со скачками, описывающих динамику цен акций предприятий авиационной отрасли. *Труды МАИ.* 2012;59:230-242.
19. Khadjeh Nassirtoussi A., Ying Wah T., Ngo Chek Ling D. A novel FOREX prediction methodology based on fundamental data. *Afr. J. Bus. Manag.* 2011;5(20):8322-8330. <https://doi.org/10.5897/AJBM11.798>
20. Anastasakis L., Mort N. Exchange rate forecasting using a combined parametric and non-parametric self-organising modelling approach. *Expert Sys. Appl.* 2009;36(10):12001-12011. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.03.057>
21. Vanstone B., Finnie G. Enhancing stockmarket trading performance with ANNs. *Expert Sys. Appl.* 2010;37(9):6602-6610. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.02.124>
22. Vanstone B., Finnie G. An empirical methodology for developing stockmarket trading systems using artificial neural networks. *Expert Sys. Appl.* 2009;36(3):6668-6680. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.08.019>
23. Sermpinis G., Laws J., Karathanasopoulos A., Dunis C. L. Forecasting and trading the EUR/USD exchange rate with gene expression and psi sigma neural networks. *Expert Sys. Appl.* August 2012;39(10):8865-8877. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.02.022>
24. Huang S.-C., Chuang P.-J., Wu C.-F., Lai H.-J. Chaos-based support vector regressions for exchange rate forecasting. *Expert Sys. Appl.* 2010;37(12):8590-8598. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.06.001>
25. Premanode B., Toumazou C. Improving prediction of exchange rates using differential EMD. *Expert Sys. Appl.* 2013;40(1):377-384. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.07.048>
26. Bahrepour M., Akbarzadeh T. M.-R., Yaghoobi M., Naghibi S. M.-B. An adaptive ordered fuzzy time series with application to FOREX. *Expert Sys. Appl.* 2011;38(1):475-485. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.06.087>
27. Mabu S., Hirasawa K., Obayashi M., Kuremoto T. Enhanced decision making mechanism of rule-based genetic network programming for creating stock trading signals. *Expert Sys. Appl.* 2013;40(16):6311-6320. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.05.037>
28. Орлов Ю.Н., Осминин К.П. Нестационарные временные ряды: методы прогнозирования с примерами анализа финансовых и сырьевых рынков. М.: ЛИБРОКОМ, 2011. 384 с. ISBN 978-5-397-071272-7
29. Орлов Ю.Н., Федоров С.Л. Генерация нестационарных траекторий временного ряда на основе уравнения Фоккера–Планка. *ТРУДЫ МФТИ.* 2016;8(2):126-133.
30. Fuentes M. Non-Linear Diffusion and Power Law Properties of Heterogeneous Systems: Application to Financial Time Series. *Entropy.* 2018;20(9):649. <https://doi.org/10.3390/e20090649>
31. Gunawardana A., Meek C., Xu P. A Model for Temporal Dependencies in Event Streams. Microsoft Research. 2011. 8 p. <https://www.microsoft.com/en-us/research/publication/a-model-for-temporal-dependencies-in-event-streams/>
32. Suraj Singh Chouhan, Ravi Khatri. Data Mining based Technique for Natural Event Pre-diction and Disaster Management. *International Journal of Computer Applications (IJCA).* 2016;139(14):34-39. <https://doi.org/10.5120/ijca2016909102>
33. Radinsky K., Horvitz E. Mining the Web to Predict Future Events. In: Proceedings of the 6th ACM International Conference on Web Search and Data Mining. ACM. 2013. P. 255-264. <https://doi.org/10.1145/2433396.2433431>
34. Chatrath A., Miao H., Ramchander S., & Villupuram S. Currency jumps, cojumps and the role of macro news. *J. Int. Money Financ.* February 2014;40:42-62. <https://doi.org/10.1016/j.jimonfin.2013.08.018>
35. Huang C.-J., Liao J.-J., Yang D.-X., Chang T.-Y., & Luo Y.-C. Realization of a news dissemination agent based on weighted association rules and text mining techniques. *Expert Sys. Appl.* 2010;37(9):6409-6413. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.02.078>
36. Robertson C., Geva S., & Wolff R. What types of events provide the strongest evidence that the stock market is affected by company specific news? In: Proc. Fifth Australasian Data mining conference (AusDM2006). 2006;61:145-153.

37. Preethi P.G., Uma V., Ajit Kumar. Temporal Sentiment Analysis and Causal Rules Extraction from Tweets for Event Prediction. *Procedia Computer Science*. 2015;48:84-89.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.04.154>
38. Gerber M.S. Predicting crime using Twitter and kernel density estimation. *Decis. Support Syst.* 2014;61(1):115-125.
<https://doi.org/10.1016/j.dss.2014.02.003>
39. Квейд Э. Анализ сложных систем. М.: Советское радио, 1969. 512 с.
40. Баскакова Ю.М., Дёмин А.А., Лашук Н.Е., Терентьева Н.Н. Американские практики электорального прогнозирования. Доклад по результатам исследования ВЦИОМ. М.: ОАО «Всероссийский центр изучения общественного мнения», 2016. 40 с. ISBN 978-5-9905970-5-1
41. Материалы круглого стола Общественной палаты РФ «Математика на службе избирателей», Пресс-служба Общественной палаты РФ. [Электронный ресурс]: режим доступа – свободный (дата обращения: 14.02.2019). URL: <https://www.oprf.ru/press/news/2018/newsitem/44277>
42. Толстова Ю.Н. Математическое моделирование социальных процессов и социология. *Социологические исследования*. 2018;9:104-112.
<https://doi.org/10.31857/S013216250001965-4>
43. Толстова Ю.Н. Соотнесение теоретического и эмпирического знания при использовании математических методов в социологическом исследовании. *Социологические исследования*. 2018;12:39-48.
<https://doi.org/10.31857/S013216250003164-3>
44. Walther D. Picking the winner(s): Forecasting elections in multiparty systems. *Elect. Stud.* December 2015;40:1-13.
<https://doi.org/10.1016/j.electstud.2015.06.003>
45. Kryshchanovskii A.O. The Russian population's attitude toward the president's activities. *Russian Politics & Law*. 1995;33(6):61-68.
<https://doi.org/10.2753/RUP1061-1940330661>
46. Крыштановский А. Методы анализа временных рядов. *Мониторинг общественного мнения: экономические и социальные перемены (4М)*. 2000;2(46):44-51.
47. Крыштановский А.О. «Кластеры на факторах» – об одном распространенном заблуждении. *Социология: Методология, методы, математические модели*. 2005;21:172-187.
48. Крыштановский А.О. Ограничения метода регрессионного анализа. *Социология: Методология, методы, математические модели*. 2000;12:96-112.
49. Bonica A.A., Rosenthal H.B., Rothman D.J.C. The political polarization of physicians in the United States: An analysis of campaign contributions to federal elections, 1991 through 2012. *JAMA Internal Medicine*. 2014;174(8):1308-1317.
<https://doi.org/10.1001/jamainternmed.2014.2105>
50. Panagopoulos C. The dynamics of voter preferences in the 2010 congressional midterm elections. *Forum*. 2010;8(4):Article number 9.
<https://doi.org/10.2202/1540-8884.1402>
51. Чуров В.Е., Арлазаров В.Л., Соловьев А.В. Итоги выборов. Анализ электоральных предпочтений. *Труды Института системного анализа Российской Академии Наук*. 2008;38:6-22.
52. Foucault M., Nadeau R. Forecasting the 2012 French Presidential Election. *PS: Political Science & Politics*. April 2012;45(2):218-222.
<https://doi.org/10.1017/S1049096512000066>
53. Healy A., Lenz G.S. Substituting the end for the whole: Why voters respond primarily to the election-year economy. *American Journal of Political Science*. January 2014;58(1):31-47.
<https://doi.org/10.1111/ajps.12053>
54. Gormley I.C., Murphy T.B. A grade of membership model for rank data. *Bayesian Analysis*. 2009;4(2):265-296.
<https://doi.org/10.1214/09-BA410>
55. Докторов Б. Главная проблема Обамы – не республиканцы, но экономика (Аналитики избирательной кампании активно изучают прошлое для предсказания будущего). 11 Сентября 2011. [Электронный ресурс]: режим доступа – свободный (дата обращения: 14.02.2019). URL: <https://fom.ru/special/kto-stanet-prezidentom-ssha/10161>
56. Erikson R.S.A., Panagopoulos C.B., Wlezien C.D. Likely (and unlikely) voters and the assessment of campaign dynamics. *Public Opin. Quart.* 2004;68(4):588-601.
<https://doi.org/10.1093/poq/nfh041>
57. Dassonneville R. Electoral volatility, political sophistication, trust and efficacy: A study on changes in voter preferences during the Belgian regional elections of 2009. *Acta Politica*. 2012;47(1):18-41.
<https://doi.org/10.1057/ap.2011.19>
58. Dewan T.A., Shepsle K.A.B. Political economy models of elections. *Annu. Rev. Polit. Sci.* 2011;14(1):311-330.
<https://doi.org/10.1146/annurev.polisci.12.042507.094704>
59. Mundim P.S. The press and the vote in the 2002 and 2006 Brazilian presidential campaigns [Imprensa e voto nas eleições presidenciais Brasileiras de 2002 e 2006]. *Revista de Sociologia e Política*. 2012;20(41):123-147.
<https://doi.org/10.1590/S0104-44782012000100009>

60. Hillygus S.D. The evolution of election polling in the United States. *Public Opin. Quart.* 2011;75(5):962-981. <https://doi.org/10.1093/poq/nfr054>
61. Cassino D. How Today's Political Polling Works. *Harvard Business Review*. August, 2016. <https://hbr.org/2016/08/how-todays-political-polling-works>
62. Wright Fred A., Wright Alec A. How surprising was Trump's victory? Evaluations of the 2016 U.S. presidential election and a new poll aggregation model. *Electoral Studies*. August 2018;54:81-89. <https://doi.org/10.1016/j.electstud.2018.05.001>
63. Erikson R.S., Wlezien C. Forecasting the Presidential Vote with Leading Economic Indicators and the Polls. *PS: Political Science & Politics*. October 2016;49:669-672. <https://doi.org/10.1017/S1049096516001293>
64. Kennedy C., Blumenthal M., Clement S., Clinton J.D., Durand C., Franklin C., McGeeney K. An Evaluation of the 2016 Election Polls in the United States. *Public Opin. Quart.* March 2018;82(1):1-33. <https://doi.org/10.1093/poq/nfx047>
65. Fisher S.D., Ford R., Jennings W., Pickup M., Wlezien C. From polls to votes to seats: Forecasting the 2010 British general election. *Electoral Studies*. June 2011;30(2):250-257. <https://doi.org/10.1016/j.electstud.2010.09.005>
66. Linzer D.A. Dynamic Bayesian forecasting of presidential elections in the states. *J. Am. Stat. Assoc.* 2013;108(501):124-134. <https://doi.org/10.1080/01621459.2012.737735>
67. Walther D., Hellström J. The verdict in the polls: how government stability is affected by popular support. *West European Politics*. 2019;42(3):593-617. <https://doi.org/10.1080/01402382.2018.1490598>
68. Belenky A.S., King D.C. A mathematical model for estimating the potential margin of state undecided voters for a candidate in a US Federal election. *Math. Comput. Model.* March 2007;45(5-6):585-593. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2006.07.007>
69. Norpeth H., Gschwend T. The chancellor model: Forecasting German elections. *Int. J. Forecasting*. January–March 2010;26(1):42-53. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2009.02.008>
70. Montalvo J.G., Papaspiliopoulos O., Stumpf-Fétizon T. Bayesian Forecasting of Electoral Outcomes with new Parties' Competition. Barcelona Graduate School of Economics. Working Papers 1065. February 4, 2019. [Электронный ресурс]. <https://ideas.repec.org/p/bge/wpaper/1065.html>.

References:

1. Avzalova E.I. Internet Communication in the US Election Campaign. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Politologiya. Religiovedenie» = The Bulletin of Irkutsk State University». Series «Political Science and Religion Studies»*. 2017;22:185-194 (in Russ.).
2. Course D. Israeli Parliamentary Elections 2015: Causes, Results and Trends. June 8, 2015. Institute of the Middle East. G. <http://www.iimes.ru/?p=24736> (in Russ.).
3. Rodin A. Sky network: why the new Mask project is a challenge for Russia. February 17, 2018 RBC. Opinion. [Electronic resource]. https://www.rbc.ru/opinions/technology_and_media/17/02/2018/5a86a1559a79473fe79a5813 (in Russ.).
4. Boks D., Dzhenkins G. *Analiz vremennykh ryadov. Prognoz i upravlenie* (Time Series Analysis. Forecast and management). Moscow: Mir; 1974. 248 p. (in Russ.).
[Box D., Dzhenkins G. Time Series Analysis: Forecasting and Control. San Francisco: Hold-en-Day; 1970.]
5. L'yuis K.D. *Metody prognozirovaniya ekonomicheskikh pokazatelei* (Methods of forecasting economic indicators). Moscow: Finansy i statistika; 1986. 130 p. (in Russ.).
6. Borovkov A.A. *Matematicheskaya statistika* (Mathematical statistics). Moscow: Fizmatlit; 2007. 704 p. (in Russ.) ISBN 978-5-94052-141-X
7. Kendall M., Styuart A. *Statisticheskie vyvody i svyazi* (Statistical conclusions and relationships). Moscow: Nauka; 1973. 900 p. (in Russ.).
8. Kendall M., Styuart A. *Mnogomernyi statisticheskii analiz i vremennye ryady* (Multidimensional statistical analysis and time series). Moscow: Nauka; 1976. 736 p. (in Russ.).
[Kendall M.G., Stuart A. The advanced theory of statistics (London)]
9. Uilks S. *Matematicheskaya statistika* (Mathematical statistics). Moscow: Nauka; 1967. 632 p. (in Russ.).
10. Kobzar' A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika* (Applied Mathematical Statistics). Moscow: Fizmatlit; 2006. 816 p. (in Russ.). ISBN 5-9221-0707-0
11. Kagan A.M., Linnik Yu.V., Rao S.R. *Kharakterizatsionnye zadachi matematicheskoi statistiki* (Characterization problems of mathematical statistics). Moscow: Nauka; 1972. 248 p. (in Russ.).
12. Foster F.G., Stuart A. A distribution-free test in time series dated on the breaking of records. *JRSS.* 1954;B16(1):1-22. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1954.tb00143.x>

13. Orlov Yu.N., Shagov D.O. Indicative statistics for non-stationary time series. *Preprinty IPM im. M. V. Keldysha = Keldysh Institute preprints*. 2011;053:20 (in Russ.).
14. Gnedenko B.V. *Kurs teorii veroyatnostei* (Probability theory course). Moscow: Fizmatlit, 1961. 406 p. (in Russ.)
15. Shugai Yu.S. Neural network algorithms for predicting events and searching for precursors in multidimensional time series. *Iskustvennyi intellekt = Artificial*. 2004;2:211-215 (in Russ.).
16. Ermakov S.M. *Metod Monte-Karlo i smezhnye voprosy* (Monte Carlo method and related issues). Moscow: Nauka; 1975. 471 p. (in Russ.).
17. Ermakov S.M., Mikhailov G.A. *Statisticheskoe modelirovanie* (Statistical Modeling). Moscow: Nauka; 1982. 296 p. (in Russ.).
18. Kozhevnikov A.S. The software for statistical modeling and analysis of random processes with jumps, which describe the stock price dynamics of aircraft industry. *Trudy MAI*. 2012;59:230-242 (in Russ.).
19. Khadjeh Nassirtoussi A., Ying Wah T., Ngo Chek Ling D. A novel FOREX prediction methodology based on fundamental data. *Afr. J. Bus. Manag.* 2011;5(20):8322-8330.
<https://doi.org/10.5897/AJBM11.798>
20. Anastasakis L., Mort N. Exchange rate forecasting using a combined parametric and non-parametric self-organising modelling approach. *Expert Sys. Appl.* 2009;36(10):12001-12011.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.03.057>
21. Vanstone B., Finnie G. Enhancing stockmarket trading performance with ANNs. *Expert Sys. Appl.* 2010;37(9):6602-6610.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.02.124>
22. Vanstone B., Finnie G. An empirical methodology for developing stockmarket trading systems using artificial neural networks. *Expert Sys. Appl.* 2009;36(3):6668-6680.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.08.019>
23. Sermpinis G., Laws J., Karathanasopoulos A., Dunis C. L. Forecasting and trading the EUR/USD exchange rate with gene expression and psi sigma neural networks. *Expert Sys. Appl.* August 2012;39(10):8865-8877.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.02.022>
24. Huang S.-C., Chuang P.-J., Wu C.-F., Lai H.-J. Chaos-based support vector regressions for exchange rate forecasting. *Expert Sys. Appl.* 2010;37(12):8590-8598.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.06.001>
25. Premanode B., Toumazou C. Improving prediction of exchange rates using differential EMD. *Expert Sys. Appl.* 2013;40(1):377-384.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.07.048>
26. Bahrepour M., Akbarzadeh T. M.-R., Yaghoobi M., Naghibi S. M.-B. An adaptive ordered fuzzy time series with application to FOREX. *Expert Sys. Appl.* 2011;38(1):475-485.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.06.087>
27. Mabu S., Hirasawa K., Obayashi M., Kuremoto T. Enhanced decision making mechanism of rule-based genetic network programming for creating stock trading signals. *Expert Sys. Appl.* 2013;40(16):6311-6320.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.05.037>
28. Orlov Yu.N., Osminin K.P. *Nestatsionarnye vremennye ryady: metody prognozirovaniya s primerami analiza finansovykh i syr'evykh rynkov* (Unsteady time series: forecasting methods with examples of analysis of financial and commodity markets). Moscow: LIBROKOM, 2011. 384 p. (in Russ.). ISBN 978-5-397-071272-7
29. Orlov Yu.N., Fedorov S.L. Nonstationary time series trajectories generation on the basis of the Fokker-Planck equation. *TRUDY MFTI = Trudy MIPT*. 2016;8(2):126-133 (in Russ.).
30. Fuentes M. Non-Linear Diffusion and Power Law Properties of Heterogeneous Systems: Application to Financial Time Series. *Entropy*. 2018;20(9):649.
<https://doi.org/10.3390/e20090649>
31. Gunawardana A., Meek C., Xu P. A Model for Temporal Dependencies in Event Streams. Microsoft Research. 2011. 8 p.
<https://www.microsoft.com/en-us/research/publication/a-model-for-temporal-dependencies-in-event-streams/>
32. Suraj Singh Chouhan, Ravi Khatri. Data Mining based Technique for Natural Event Prediction and Disaster Management. *International Journal of Computer Applications (IJCA)*. 2016;139(14):34-39.
<https://doi.org/10.5120/ijca2016909102>
33. Radinsky K., Horvitz E. Mining the Web to Predict Future Events. In: *Proceedings of the 6th ACM International Conference on Web Search and Data Mining*. ACM. 2013. P. 255-264.
<https://doi.org/10.1145/2433396.2433431>
34. Chatrath A., Miao H., Ramchander S., & Villupuram S. Currency jumps, cojumps and the role of macro news. *J. Int. Money Financ.* February 2014;40:42-62.
<https://doi.org/10.1016/j.jimonfin.2013.08.018>
35. Huang C.-J., Liao J.-J., Yang D.-X., Chang T.-Y., & Luo Y.-C. Realization of a news dissemination agent based on weighted association rules and text mining techniques. *Expert Sys. Appl.* 2010;37(9):6409-6413.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.02.078>

36. Robertson C., Geva S., & Wolff R. What types of events provide the strongest evidence that the stock market is affected by company specific news? In: Proc. Fifth Australasian Data mining conference (AusDM2006). 2006;61:145-153.
37. Preethi P.G., Uma V., Ajit Kumar. Temporal Sentiment Analysis and Causal Rules Extraction from Tweets for Event Prediction. *Procedia Computer Science*. 2015;48:84-89.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.04.154>
38. Gerber M.S. Predicting crime using Twitter and kernel density estimation. *Decis. Support Syst.* 2014;61(1):115-125.
<https://doi.org/10.1016/j.dss.2014.02.003>
39. Kveid E. Analiz slozhnykh system (Analysis of complex systems). Moscow: Sovetskoe radio; 1969. 512 p. (in Russ.).
40. Baskakova Yu.M., Demin A.A., Lashuk N.E., Terent'eva N.N. *Amerikanskii praktiki elektoral'nogo prognozirovaniya. Doklad po rezul'tatam issledovaniya VTsIOM* (American practices of electoral forecasting. Report on the results of a VTsIOM study). Moscow: OAO «Vserossiiskii tsentr izucheniya obshchestvennogo mneniya»; 2016. 40 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9905970-5-1
41. *Materialy kruglogo stola Obshchestvennoi palaty RF «Matematika na sluzhbe izbiratelei», Press-sluzhba Obshchestvennoi palaty RF* (Materials of the round table of the Public Chamber of the Russian Federation "Mathematics in the Service of Voters", Press Service of the Public Chamber of the Russian Federation). [Electronic resource]:
<https://www.oprf.ru/press/news/2018/newsitem/44277> (in Russ.).
42. Tolstova Yu.N. Mathematical Modeling of Social Processes and Sociology. *Sotsiologicheskie issledovaniya = Sociological Studies*. 2018;9:104-112 (in Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S013216250001965-4>
43. Tolstova Yu.N. Correlation of Theoretical and Empirical Knowledge when Using Mathematical Methods in Sociological Research. *Sotsiologicheskie issledovaniya = Sociological Studies*. 2018;12:39-48 (in Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S013216250003164-3>
44. Walther D. Picking the winner(s): Forecasting elections in multiparty systems. *Elect. Stud.* December 2015;40:1-13.
<https://doi.org/10.1016/j.electstud.2015.06.003>
45. Kryshtanovskii A.O. The Russian population's attitude toward the president's activities. *Russian Politics & Law*. 1995;33(6):61-68.
<https://doi.org/10.2753/RUP1061-1940330661>
46. Kryshtanovskii A. Methods of time series analysis. *Monitoring obshchestvennogo mneniya: ekonomicheskie i sotsial'nye peremeny = Public Opinion Monitoring: Economic and Social Change*. 2000;2(46):44-51 (in Russ.).
47. Kryshtanovskii A.O. "Clusters on factors" is about one common misconception. *Sotsiologiya: Metodologiya, metody, matematicheskie modeli (4M) = Sociology: Methodology, Methods, Mathematical Modeling (4M)*. 2005;21:172-187 (in Russ.).
48. Kryshtanovskii A.O. Limitations of the regression analysis method. *Sotsiologiya: Metodologiya, metody, matematicheskie modeli (4M) = Sociology: Methodology, Methods, Mathematical Modeling (4M)*. 2000;12:96-112 (in Russ.).
49. Bonica A.A., Rosenthal H.B., Rothman D.J.C. The political polarization of physicians in the United States: An analysis of campaign contributions to federal elections, 1991 through 2012. *JAMA Internal Medicine*. 2014;174(8):1308-1317.
<https://doi.org/10.1001/jamainternmed.2014.2105>
50. Panagopoulos C. The dynamics of voter preferences in the 2010 congressional midterm elections. *Forum*. 2010;8(4):Article number 9.
<https://doi.org/10.2202/1540-8884.1402>
51. Churov V.E., Arlazarov V.L., Solov'ev A.V. Election Results. Analysis of Electoral Preferences. *Trudy Instituta sistemnogo analiza rossiyskoy akademii nauk = Proceeding of the Institute for Systems Analysis of the Russian Academy of Science*. 2008;38:6-22 (in Russ.).
52. Foucault M., Nadeau R. Forecasting the 2012 French Presidential Election. *PS: Political Science & Politics*. April 2012;45(2):218-222.
<https://doi.org/10.1017/S1049096512000066>
53. Healy A., Lenz G.S. Substituting the end for the whole: Why voters respond primarily to the election-year economy. *American Journal of Political Science*. January 2014;58(1):31-47.
<https://doi.org/10.1111/ajps.12053>
54. Gormley I.C., Murphy T.B. A grade of membership model for rank data. *Bayesian Analysis*. 2009;4(2):265-296.
<https://doi.org/10.1214/09-BA410>
55. Doktorov B. *Glavnaya problema Obamy – ne respublikancy, no ekonomika (Analitiki izbiratel'noj kampanii aktivno izuchayut proshloe dlya predskazaniya budushchego)* (The main problem of Obama is not in the Republicans, but in the economy (Campaign analysts are actively studying the past to predict the future)). 11 Sept. 2011. [Electronic Resource]:
<https://fom.ru/special/kto-stanet-prezidentom-ssha/10161>
56. Erikson R.S.A., Panagopoulos C.B., Wlezien C.D. Likely (and unlikely) voters and the assessment of campaign dynamics. *Public Opin. Quart.* 2004;68(4):588-601.
<https://doi.org/10.1093/poq/nfh041>
57. Dassonneville R. Electoral volatility, political sophistication, trust and efficacy: A study on changes in voter preferences during the Belgian regional elections of 2009. *Acta Politica*. 2012;47(1):18-41.
<https://doi.org/10.1057/ap.2011.19>

58. Dewan T.A., Shepsle K.A.B. Political economy models of elections. *Annu. Rev. Polit. Sci.* 2011;14(1):311-330. <https://doi.org/10.1146/annurev.polisci.12.042507.094704>
59. Mundim P.S. The press and the vote in the 2002 and 2006 Brazilian presidential campaigns [Imprensa e voto nas eleições presidenciais Brasileiras de 2002 e 2006]. *Revista de Sociologia e Política.* 2012;20(41):123-147. <https://doi.org/10.1590/S0104-44782012000100009>
60. Hillygus S.D. The evolution of election polling in the United States. *Public Opin. Quart.* 2011;75(5):962-981. <https://doi.org/10.1093/poq/nfr054>
61. Cassino D. How Today's Political Polling Works. Harvard Business Review. August, 2016. [Electronic Resource]: <https://hbr.org/2016/08/how-todays-political-polling-works>
62. Wright Fred A., Wright Alec A. How surprising was Trump's victory? Evaluations of the 2016 U.S. presidential election and a new poll aggregation model. *Electoral Studies.* August 2018;54:81-89. <https://doi.org/10.1016/j.electstud.2018.05.001>
63. Erikson R.S., Wlezien C. Forecasting the Presidential Vote with Leading Economic Indicators and the Polls. *PS: Political Science & Politics.* October 2016;49:669-672. <https://doi.org/10.1017/S1049096516001293>
64. Kennedy C., Blumenthal M., Clement S., Clinton J.D., Durand C., Franklin C., McGeeney K. An Evaluation of the 2016 Election Polls in the United States. *Public Opin. Quart.* March 2018;82(1):1-33. <https://doi.org/10.1093/poq/nfx047>
65. Fisher S.D., Ford R., Jennings W., Pickup M., Wlezien C. From polls to votes to seats: Forecasting the 2010 British general election. *Electoral Studies.* June 2011;30(2):250-257. <https://doi.org/10.1016/j.electstud.2010.09.005>
66. Linzer D.A. Dynamic Bayesian forecasting of presidential elections in the states. *J. Am. Stat. Assoc.* 2013;108(501):124-134. <https://doi.org/10.1080/01621459.2012.737735>
67. Walther D., Hellström J. The verdict in the polls: how government stability is affected by popular support. *West European Politics.* 2019;42(3):593-617. <https://doi.org/10.1080/01402382.2018.1490598>
68. Belenky A.S., King D.C. A mathematical model for estimating the potential margin of state undecided voters for a candidate in a US Federal election. *Math. Comput. Model.* March 2007;45(5-6):585-593. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2006.07.007>
69. Norpoth H., Gschwend T. The chancellor model: Forecasting German elections. *Int. J. Forecasting.* January–March 2010;26(1):42-53. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2009.02.008>
70. Montalvo J.G., Papaspiliopoulos O., Stumpf-Fétizon T. Bayesian Forecasting of Electoral Outcomes with new Parties' Competition. Barcelona Graduate School of Economics. Working Papers 1065. February 4, 2019. <https://ideas.repec.org/p/bge/wpaper/1065.html>

Об авторах:

Андреанова Елена Гельевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры корпоративных информационных систем Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Scopus Author ID: 57200555430, <http://orcid.org/0000-0001-6418-6797>

Головин Сергей Анатольевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой математического обеспечения и стандартизации информационных технологий Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Зыков Сергей Викторович, доктор технических наук, доцент, профессор Департамента программной инженерии факультета компьютерных наук Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (101000, Россия, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20). Scopus Author ID: 36146486900, <http://orcid.org/0000-0002-2115-5461>

Лесько Сергей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление и моделирование систем» Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Scopus Author ID: 57189664364, <https://orcid.org/0000-0002-6641-1609>

Чукалина Екатерина Романовна, магистрант кафедры корпоративных информационных систем Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the authors:

Elena G. Andrianova, Cand. Sci. (Engineering), Associated Professor, Associate Professor of the Department of ERP, IT Institute, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). Scopus Author ID: 57200555430, <http://orcid.org/0000-0001-6418-6797>

Sergey A. Golovin, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of Department of Mathematical Support and Standardization of Information Technologies, IT Institute, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Sergey V. Zыkov, Dr. Sci. (Engineering), Associated Professor, Professor of School of Software Engineering of Faculty of Computer Science, Higher School of Economics, National Research University (20, Myasnitskaya ul., Moscow 101000, Russia). Scopus Author ID: 36146486900, <http://orcid.org/0000-0002-2115-5461>

Sergey A. Lesko, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department «Management and Modeling of Systems», Institute of Integrated Security and Special Instrumentation, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). Scopus Author ID: 57189664364, <https://orcid.org/0000-0002-6641-1609>

Ekaterina R. Chukalina, student, IT Institute, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Поступила: 09.01.2020; Получена после доработки: 06.03.2020; Принята к опубликованию: 29.06.2020.

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-4-46-65>



УДК 004.93:004.5

Технологии расширенной реальности – новый компонент промышленной инженерии и производственных систем

**А.С. Зуев[@],
М.А. Макущенко,
М.Е. Иванов,
Е.С. Меркулов**

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: zuev_a@mirea.ru

Технологии расширенной (виртуальной, дополненной и смешанной) реальности рассматриваются как новый универсальный компонент в составе методологической базы производственной (промышленной) инженерии, получающий возможности широкого применения как в условиях экстенсивного и интенсивного развития несущих и прочих отраслей четвертого и пятого, так и в контексте формирования ядра шестого технологического уклада. Обосновываются роль и место данных технологий в современных технологических процессах и производственных системах (в том числе в гибком, мелкосерийном и штучном производстве), а также в контексте внедрения киберфизических систем и предстоящей четвертой промышленной революции. Выделен состав задач, универсальных для широкого спектра отраслей любой национальной экономики, наиболее эффективное решение которых в условиях текущего и прогнозируемого уровня развития человеко-машинного взаимодействия может обеспечиваться в результате применения технологий виртуальной, дополненной и смешанной реальностей. На основе сопоставления принципов реализации и примеров прикладного внедрения обосновывается соответствие содержания понятия и возможностей применения «технологий расширенной

реальности» назначению и сферам внедрения сквозной цифровой технологии «виртуальная и дополненная реальности». Сделан и обоснован вывод о целесообразности интеграции технологий расширенной реальности на базе универсального программно-аппаратного комплекса, предоставляющего сервисы виртуальной, дополненной и смешанной реальностей в соответствии с содержанием конкретной задачи технологического процесса или выбранным пользователем режимом его эксплуатации. Приведены описания постановок задач, условий проведения и результатов экспериментов по разработке и тестированию интерактивных сред расширенной реальности, выполненных в Институте информационных технологий РТУ МИРЭА в 2019–2020 гг.

Ключевые слова: расширенная реальность, промышленная инженерия, производственная система, технологический процесс, технологический уклад, промышленная революция.

Для цитирования: Зуев А.С., Макущенко М.А., Иванов М.Е., Меркулов Е.С. Технологии расширенной реальности – новый компонент промышленной инженерии и производственных систем. *Российский технологический журнал*. 2020;8(4):46-65. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-4-46-65>

Extended reality technology – a new component in industrial engineering and production systems

**Andrey S. Zuev[@],
Maksim A. Makushchenko,
Mikhail E. Ivanov,
Egor S. Merkulov**

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

@Corresponding author, e-mail: zuev_a@mirea.ru

Extended (virtual, augmented and mixed) reality technology gets considered as a new universal component of production (industrial) engineering's methodological basis, receiving the possibilities for wide use in both extensive and intensive development of carrying and other branches of the fourth, fifth and the forming nucleus of the sixth technological wave. The article gives grounds for the role and place of this kind of technology in contemporary technological processes and production systems (including the flexible, small-volume and discrete production), and in the context of cyberphysical systems and the incoming fourth industrial revolution. The authors describe underline the set of tasks that are universal for a wide range of branches in any national economy, that can be most efficiently completed in terms of the current and prognosed level of development of man-machine interaction can be provided for as a result of using VR, AR and MR technologies. Based on the comparison of implementation principles and examples of applied implementation, the article gives grounds for term correspondence and opportunities of use of "extended reality technology". The authors have made and explained the conclusion on practicability of integrating extended reality technology based on a universal hardware-software complex that provides VR, AR and MR services corresponding to the composition of a given task within the technological process or the operating mode chosen by a user. The article gives descriptions of task assignments, terms of conduct and results of experiments on designing and testing extended reality interactive environments performed at the institute of information technology RTU MIREA in 2019–2020.

Keywords: extended reality, industrial engineering, production system, technological process, technological wave, industrial revolution.

For citation: Zuev A.S., Makushchenko M.A., Ivanov M.E., Merkulov E.S. Extended reality technology – a new component in industrial engineering and production systems. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(4):46-65 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-4-46-65>

Введение

Технологическое и экономическое развитие государств непосредственно связано с научно-техническим прогрессом, с поиском и внедрением более эффективных способов формирования добавленной стоимости в отраслях национальной экономики, а также с созданием ее новых отраслей [1]. При этом достаточно продолжительные периоды эволюционного развития на основе совершенствования существующих технологий сменяются динамичными этапами научно-технических революций – изобретением и внедрением в производственные системы принципиально новых технологий и разработок, приводящих к расширению производственных возможностей как отдельных государств, так и мировой экономики в целом [2]. В соответствии с [3] процесс технико-экономического развития государства может быть представлен в виде последовательного замещения крупных комплексов технологически сопряженных производств – технологических укладов. При этом нововведения, революционизирующие технологическую структуру экономики, получили название «ключевой фактор», а отрасли, интенсивно его использующие и играющие ведущую роль в распространении нового технологического уклада, принято называть несущими отраслями.

Вместе с тем, вне зависимости от долевого состава и доминирования технологических укладов в структуре национальной экономики государства [4], построение производственных систем и технологических процессов в ее отраслях осуществляется с использованием доступного (освоенного) в текущий период времени инструментария производственной (промышленной) инженерии [5–7] – полидисциплинарного направления исследований в сфере проектирования, построения и улучшения интегрированных систем, состоящих из людей, денежных средств, знаний, информации, оборудования, энергии, материалов и процессов. С этой точки зрения состав освоенных и применяемых компонентов методологической базы производственной инженерии предопределяет условия формирования и функционирования производственных систем во всех, в том числе при использовании ключевого фактора – в несущих отраслях любого технологического уклада.

В контексте развития цифровой экономики Российской Федерации [8] и предстоящей четвертой промышленной революции (Индустрии 4.0) [9] в отдельную технологическую компоненту (сквозную цифровую технологию) выделены технологии виртуальной и дополненной реальностей. В настоящей статье авторами обосновано соответствие назначения и сфер применения данных технологий содержанию понятия и возможностям реализации «технологий расширенной реальности» [10], а также их ключевое значение как новой компоненты в составе методологической базы производственной (промышленной) инженерии, получающей возможности универсального применения в производственных системах и технологических процессах широкого спектра отраслей любой национальной экономики и в условиях любого долевого состава и доминирования технологических

укладов. Авторами сформулирован и обоснован вывод о целесообразности интеграции технологий расширенной реальности на базе универсального программно-аппаратного комплекса, предоставляющего сервисы виртуальной, смешанной и дополненной реальностей в режиме реального времени для технологических процессов производственных систем, приведены результаты выполненных экспериментов по разработке соответствующих интерактивных сред.

Производственная инженерия в условиях технологических укладов

К настоящему времени в мировом технико-экономическом развитии можно выделить жизненные циклы пяти последовательно сменявшихся друг друга и начало формирования шестого технологического уклада (табл. 1) [11]. При этом начала первого, третьего и пятого укладов были связаны с промышленными революциями, четвертая из которых прогнозируется в первой половине цикла шестого уклада [12, 13].

Таблица 1. Периоды доминирования, ядро и ключевые факторы технологических укладов

Уклад	Период доминирования, годы	Ядро несущих отраслей	Ключевой фактор
1	1770–1830	Текстильная промышленность, текстильное машиностроение, выплавка чугуна, обработка железа, строительство каналов, водяной двигатель	Текстильные машины
2	1830–1880	Паровой двигатель, железнодорожное строительство, транспорт, пароходо- и машиностроение, станкоинструментальная, угольная промышленность, черная металлургия	Паровой двигатель, станки
3	1880–1930	Электротехническое, тяжелое машиностроение, производство и прокат стали, линии электропередач, неорганическая химия	Электродвигатель, сталь
4	1930–1970	Автомобиле-, тракторостроение, цветная металлургия, производство товаров длительного пользования, синтетические материалы, органическая химия, производство и переработка нефти	Двигатель внутреннего сгорания, нефтехимия
5	от 1970 до 2010	Электронная промышленность, вычислительная, оптико-волоконная техника, программное обеспечение, телекоммуникации, роботостроение, производство и переработка газа, информационные услуги	Микроэлектронные компоненты
6	2010–2050	Наноэлектроника, молекулярная и нанофотоника, наноматериалы и наноструктурированные покрытия, оптические наноматериалы, наногетерогенные системы, нанобиотехнологии, наносистемная техника, наноборудование	Нанотехнологии

В каждом периоде сменяющихся жизненных циклов технологических укладов происходили формирование новых и реорганизация существовавших производственных систем и технологических процессов. Необходимость накопления, систематизации и постоянного обновления соответствующей методологической базы привела к формированию и развитию специализированного полидисциплинарного направления исследований – производственной (промышленной) инженерии. Содержание соответствующего понятия менялось вместе со сменой технологических укладов:

- 1911 год – инструментарий обеспечения эффективного функционирования производственных, строительных, транспортных или даже торговых предприятий в любой сфере деятельности, где человеческий труд направлен на выполнение любого вида работы [14];
- 1954 год – разработка условий для эффективной координации людей, материалов и оборудования с целью достижения желаемых результатов оптимальным образом [15];
- 1963 год – отрасль инженерных знаний и практики, которая анализирует, измеряет и улучшает методы выполнения задач, возложенных на людей; разрабатывает и внедряет улучшенные системы интеграции задач, поставленных перед командами; определяет, прогнозирует и оценивает полученные результаты [16];
- 1977 год – искусство создания наиболее эффективной системы, состоящей из людей, материальных ценностей, энергии и информации, с помощью которой будет достигнута конкретная цель в промышленной, экономической или социальной деятельности с заранее заданными вероятностями и точностью; системой может быть отдельное рабочее место, группа, секция, отдел, департамент, учреждение или целое предприятие [17];
- 2005 год – специалисты в области промышленной инженерии проектируют процессы и системы, которые улучшают качество и производительность, используя знания в области инженерии, математики, управления бизнесом и менеджмента; они фокусируются на том, как производятся и исполняются продукты и услуги; они объединяют людей, информацию, материалы и оборудование, которые создают инновационные и эффективные организации; помимо производства, промышленные инженеры работают и консультируют в любой отрасли, включая, в том числе, здравоохранение, связь, финансовый сектор, фармацевтику, спорт, страхование, бухгалтерский учет, банковское дело, логистику и т.д. [18].

Достаточно полный обзор современного содержания данного полидисциплинарного направления исследований можно найти, например, в [19]. На основе приведенных выше определений промышленной инженерии можно сделать вывод, что с ходом научно-технического прогресса в производственных системах и технологических процессах все более усиливался акцент на необходимости координации и управления деятельностью, как всех категорий отдельных сотрудников, так и их различных объединений на всех уровнях управления (отделов, групп, команд, бригад и т.п.). С усложнением применяемых технологий возрастал объем информации, обрабатываемой на всех уровнях производственных систем, и все большую актуальность приобретали задачи информационного обеспечения технологических процессов, особенно в части поддержки и сопровождения выполняемых людьми трудовых функций и операций. Возрастающий объем информационной нагрузки требовал поиска и внедрения все более эффективных подходов, методов и инструментов доведения информации до отдельных сотрудников и их групп с минимальными затратами времени, в удобной форме и в соответствии с содержанием конкретной задачи технологического процесса. Особую актуальность данные вопросы приобрели в производственных системах гибкого [20], мелкосерийного и штучного производства сложных промышленных изделий [21], где структура технологических процессов и состав соответствующих операций динамически изменяются.

Фактически на современном уровне научно-технического развития наиболее медлительным элементом любого технологического процесса является человек, об-

ладающий по сравнению с программно-аппаратными комплексами наихудшими параметрами по скорости восприятия и осознания (обработки) информации, принятия решений и выполнения физических действий. Это обуславливает необходимость введения в методологическую базу промышленной инженерии новейших достижений человеко-машинного взаимодействия, позволяющих минимизировать затраты времени отдельных сотрудников и их групп на ознакомление с технической документацией и инструкциями; проведение инструктажей и согласование производственных заданий; обсуждение совместно выполняемых действий; перенастройку оборудования и контроль выполнения технологических операций и т.п. В контексте внедрения киберфизических систем и предстоящей четвертой промышленной революции [22] нерационально расходовать время сотрудников на восприятие и анализ информации не только с бумажных носителей, но и с экранов устройств компьютерной техники – планшетов, смартфонов и т.п. При этом имеющиеся в настоящее время возможности расширения контента печатной продукции [23] являются абсолютно недостаточными для производственных систем.

Новым достижением человеко-машинного взаимодействия являются технологии виртуальной, дополненной и смешанной реальностей, реализующие принципиально новые способы воспроизведения мультимедийной информации. С точки зрения задач информационного обеспечения технологических процессов производственных систем в части информационной поддержки и сопровождения персонала данные технологии являются универсальным инструментарием, одинаково применимым в различных отраслях, прикладных областях и задачах.

Технологии виртуальной, дополненной и смешанной реальностей

Виртуальную, дополненную и смешанную реальности можно охарактеризовать как новые технологии реализации человеко-машинного взаимодействия [24].

Технология виртуальной реальности (virtual reality, VR) [25, 26] – это способ погружения человека в виртуальную интерактивную среду, воспринимаемую на основе органов чувств и обеспечивающую как манипулирование цифровыми объектами, так и их взаимодействие между собой и с оператором в режиме реального времени. Простейшая форма виртуальной реальности – 360-градусные изображения или видео. В средах виртуальной реальности может быть воссоздана обстановка реальных рабочих мест и производственных локаций, симулирующая сценарии выполнения отдельных операций, реализации технологических процессов или, например, развития внешних ситуаций, позволяющие сформировать у операторов знания о соответствующих корректных (и безопасных) индивидуальных и коллективных действиях, и таким образом, подготовиться к функционированию в условиях реальной обстановки без необходимости ее физического воспроизведения или иммобилизации из производственной системы на период тренировки. Примерами могут являться: обслуживание и ремонт медицинской техники [27], сборка производственных роботов [28], сельское хозяйство [29], интерактивное обучение управлению строительством [30], моделирование и проектирование транспортных средств [31], разработанный в России симулятор осмотра места происшествия криминалистом [32]. С момента появления VR исполь-

зовалась в различных областях, таких как игры, военная подготовка, архитектурный дизайн, образование, обучение социальным навыкам, моделирование хирургических процедур, помощь пожилым людям, психологическое лечение и т.п.

Технология дополненной реальности (augmented reality, AR) [25, 33] – это способ дополнения реальной окружающей обстановки мультимедийным контентом, отображаемым поверх физических объектов, и таким образом заменяющим или дополняющим их в восприятии оператора. По сути это подсказка или голограмма, нарисованная поверх реального мира. Такой способ отображения виртуальных объектов не в полной мере обеспечивает как ощущение их реального пространственного расположения относительно всей совокупности окружающих оператора физических объектов, так и восприятие всех сценариев возможного взаимодействия с ней. Среда дополненной реальности позволяет заменить бумажные носители информации или их электронные версии на экранах устройств компьютерной техники (ноутбуков, планшетов, смартфонов и т.п.) цифровыми копиями, отображаемыми в поле зрения оператора, и тем самым, например: уменьшают умственные усилия, требующиеся для работы, и позволяют оперативно адаптироваться к меняющимся характеристикам сложных промышленных изделий, в том числе в условиях гибких производственных систем, а также при мелкосерийном и штучном производстве [34]; повышают эффективность доступа к информации об истории обслуживания оборудования [35]; обеспечивают безопасность за счет исключения необходимости перефокусировки внимания [36] и т.п.

Технология смешанной реальности (mixed reality, MR) [10, 37] – это способ комбинирования и организации естественного взаимного пространственного размещения объектов реального и виртуального окружения с целью создания сред, в которых физические и цифровые объекты имеют возможность взаимодействовать в режиме реального времени. Именно визуализация взаимного размещения физических и виртуальных объектов относительно друг друга в пространстве (на переднем и заднем плане, «послойно») обеспечивает как повышенную сложность реализации, так и возможности более широкого прикладного применения данной технологии по сравнению с AR: в архитектуре, дизайне и проектировании [38]; в человеко-машинном взаимодействии [39]; в сборке, настройке, обслуживании, ремонте и эксплуатации сложных промышленных изделий, в том числе оборудования, инструментов, приборов, механизмов, бытовой и компьютерной техники [40] и т.д.

Сферы и задачи прикладного применения технологий виртуальной, дополненной и смешанной реальностей фактически идентичны для широкого спектра отраслей любой национальной экономики (табл. 2), что обуславливает их роль как новых компоненты методологической базы промышленной инженерии, а также как универсального инструмента информационного обеспечения (поддержки и сопровождения) персонала для технологических процессов производственных систем, вне зависимости от долевого состава и доминирования технологических укладов в структуре национальной экономики государства, в том числе в контексте предстоящей четвертой промышленной революции.

Эффективность применения систем виртуальной, дополненной и смешанной реальностей как инструментов информационного обеспечения подтверждена опытом внедрения в международных и российских промышленных компаниях, а также имеет синергетический эффект [25] с другими «сквозными» [8] цифровыми технологиями:

- искусственный интеллект и большие данные – алгоритмы воспроизведения голоса и действий конкретного человека без его непосредственного участия;
- компоненты робототехники и сенсорики – дистанционное управление роботизированными системами и транспортом, проведение дистанционных операций на производстве и в медицине;
- технологии беспроводной связи – увеличение скорости загрузки контента и расширение рабочей зоны носимых VR/AR устройств;
- новые производственные технологии и промышленный интернет – создание и использование максимально точных цифровых копий предприятий и оборудования;
- квантовые технологии – на данном этапе сложно конкретизировать.

Таблица 2. Универсальные сферы применения VR, AR и MR.

Сфера применения в отраслях национальной экономики	Рассматриваемая технология		
	виртуальная реальность	дополненная реальность	смешанная реальность
Обучение персонала	+	+	+
Визуализация данных	+	+	+
Моделирование и проектирование	+	–	+
Интерактивные инструкции сотрудникам	–	+	+
Информационная поддержка персонала	+	+	+
Интерактивные руководства пользователя	–	+	+

Технологии расширенной реальности и интеграция VR, AR, MR

Расширенная реальность (extended reality, XR) – это понятие, обобщающее все среды человеко-машинного взаимодействия, основанные на комбинировании реальных и виртуальных объектов [41], надмножество, включающее любые частные случаи в концепции континуума реальность-виртуальность [42], в том числе VR, AR и MR. Несмотря на различные способы классификации гибридных сред реальности и виртуальности в настоящей статье VR также обобщается понятием расширенной реальности, так как в прикладных задачах практический интерес представляет симуляция реальных объектов и их взаимодействий между собой и с оператором на основе естественных физических принципов [43].

Возможность и целесообразность концептуального обобщения всех сред человеко-компьютерного взаимодействия, основанных на комбинировании реальных и виртуальных объектов, обосновывается универсальной предпосылкой, лежащей в основе технологии их реализации – в использовании специальных носимых гарнитур (шлемов и очков) [44] для управления световым потоком, воспринимаемым оператором, в частности:

- в VR воспроизводится световой поток, не содержащий изображения света, отражающегося от реальных физических объектов;
- в AR изображение реального светового потока частично перекрывается дополнительным мультимедийным контентом;
- в MR изображение реального отражающегося от физических объектов света дополняется изображениями частей виртуальных объектов в соответствии с логикой их пространственного расположения.

Применение специальных носимых гарнитур предопределяет целесообразность реализации всех технологий, обобщаемых понятием расширенной реальности, на базе универсального программно-аппаратного комплекса [45], предоставляющего сервисы виртуальной, дополненной и смешанной реальностей в соответствии с текущей потребностью оператора или содержанием конкретной задачи технологического процесса в случае применения в производственных системах. Функциональные возможности такого комплекса будут полностью соответствовать требованиям к инструментарию информационной поддержки операторов киберфизических систем – ключевого элемента предстоящей четвертой промышленной революции [9].

Развитие персональной компьютерной техники предполагает минимизацию массогабаритных характеристик устройств. С этой точки зрения модернизация гарнитур расширенной реальности будет связана с ключевым фактором шестого технологического уклада – нанотехнологиями [11]. Например, применение специальных контактных линз [46] позволит реализовать режим VR при закрытых, а режимы AR и MR при открытых глазах оператора. Вместе с тем ключевой проблемой технологий расширенной реальности будет оставаться необходимость симуляции тактильных ощущений оператора при взаимодействии с объектами и явлениями виртуальной окружающей обстановки [47].

Эксперименты с интерактивными средами расширенной реальности

В течении 2019 и 2020 годов в лаборатории технологий мультимедиа Института информационных технологий РТУ МИРЭА выполнялся ряд экспериментов по разработке и тестированию интерактивных сред виртуальной, дополненной и смешанной реальностей, направленных на исследование возможностей их прикладного применения в технологических процессах производственных систем. Далее для каждого эксперимента кратко приведены: название, гипотеза, описание реализации, описание разработанной среды, выводы о подтверждении гипотезы.

Эксперимент № 1 – «сборка и разборка сложного промышленного изделия в среде виртуальной реальности». *Гипотеза:* в среде виртуальной реальности может быть реализован тренажер по сборке и/или разборке сложного промышленного изделия, позволяющий одному или нескольким операторам получить знания о порядке индивидуальных и/или коллективных действий при монтаже и/или демонтаже деталей с целью подготовки к выполнению соответствующих операций в реальной обстановке. *Реализация:* для гарнитур виртуальной реальности HTC, Oculus, Acer, Lenovo и HP разработано приложение — в виртуальном гараже (рис. 1а) выполнено размещение цифровых двойников комплектующих автомобиля ВАЗ 2101 («Копейка»), аналогичных представленным в техническом музее в Верхней Пышме (рис. 1б). Последовательность монтажа деталей жестко ограничена, инструкции для действий операторов визуализируются цветовым выделением комплектующего и места его установки при монтаже или размещения при демонтаже. *Выводы:* результаты применения тренажера сотрудниками и обучающимися РТУ МИРЭА, а также посетителями выставок (VI ежегодная национальная выставка «ВУЗПРОМЭКСПО-2019», Международная специализированная конференция по цифровизации экономики и промышленного бизнеса «FIT-M 2019», фестиваль науки и технологий «Geek Picnic 2019» в Краснодаре) показали, что даже не имеющие специальных знаний люди воспринимают визуализированные инструкции и способны осознать, запомнить и воспроизвести последовательности требующихся от них действий.



а

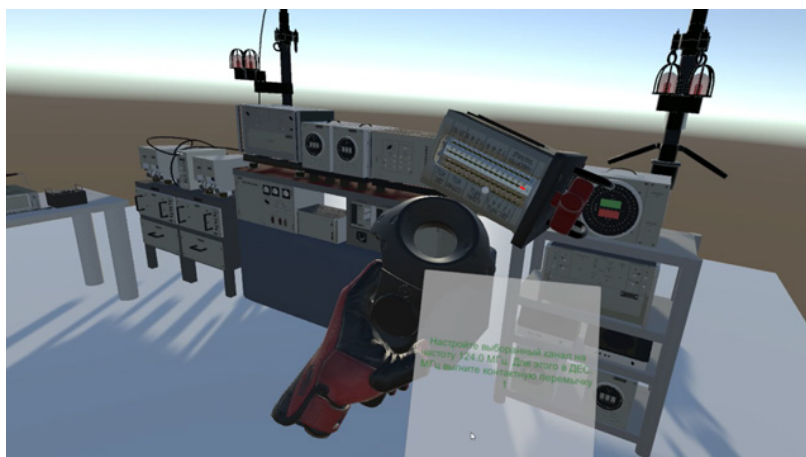


б

Рис. 1. Пример виртуальной (а) и реальной (б) сред обучения процессам сборки и разборки сложного промышленного изделия.

Эксперимент № 2 – «настройка и эксплуатация сложного промышленного изделия в среде виртуальной реальности». *Гипотеза:* в среде виртуальной реальности может быть реализован тренажер, позволяющий одному или нескольким операторам получить знания о порядке индивидуальных и/или коллективных действий по настройке и/или эксплуатации сложного промышленного изделия, с целью подготовки к выполнению соответствующих операций в реальной обстановке. *Реализация:* для гарнитур виртуальной реальности HTC, Oculus, Acer, Lenovo и HP разработано приложение – в виртуальном учебном классе выполнено размещение цифрового двойника оборудования автоматического радиопеленгатора (АРП-11) (рис. 2а), по аналогии со стендом в военном учебном центре РТУ МИРЭА (рис. 2б). В составе тренажера реализованы сценарии настройки и эксплуатации оборудования как в учебном (с визуализацией последовательности и состава требующихся действий), так и в контрольном (с фиксацией выполненных оператором операций) режимах. *Выводы:* результаты применения тренажера сотрудниками и обучающимися РТУ МИРЭА, а также посетителями выставок (VI ежегодная национальная выставка «ВУЗПРОМЭКСПО – 2019», Международная специализированная конференция по цифровизации экономики и промышленного бизнеса «FIT-M 2019», XXIII Международная выставка средств обеспечения безопасности государства «Интерполитех – 2019») показали, что даже не имеющие предварительной подготовки люди воспринимают визуализированные инструкции и способны осознать, запомнить и воспроизвести последовательности требующихся от них действий.

Эксперимент № 3 – «визуализация технической документации в среде дополненной реальности». *Гипотеза:* в среде дополненной реальности может быть выполнена визуализация совмещения элементов содержания технической документации с соответствующим промышленным изделием, обеспечивающая возможность интерактивного получения справочного мультимедийного контента. *Реализация:* для гарнитур дополненной реальности Epson (BT-300, BT-35E и Pro BT-2200) выполнена разработка клиентсерверного приложения, синхронизирующего элементы содержания технической документации



а



б

Рис. 2. Пример виртуальной (а) и реальной (б) сред обучения процессам настройки и эксплуатации сложного промышленного изделия.

с соответствующими отладочными платами (МІКRОЕ 701, 1099, 1385 и т.п.) из лаборатории кафедры вычислительной техники. В соответствии с моделью платы, а также направлением взгляда оператора на ее элементы выполняется отображение справочного мультимедийного контента (рис. 3). *Выводы:* результаты применения приложения сотрудниками и обучающимися РТУ МИРЭА, а также посетителями выставок (VI ежегодная национальная выставка «ВУЗПРОМЭКСПО – 2019», Международная специализированная конференция по цифровизации экономики и промышленного бизнеса «FIT-M 2019», XXIII Международная выставка средств обеспечения безопасности государства «Интерполитех – 2019») показали, что реализованный способ информационного обеспечения может быть применим для информационной поддержки и сопровождения операторов с любым уровнем начальной подготовки в какой-либо предметной области.

Эксперимент № 4 – «координация действий производственного персонала в среде смешанной реальности». *Гипотеза:* в среде смешанной реальности могут быть реализованы визуализация и контроль выполнения последовательности действий, требующихся от одного или нескольких сотрудников производственного персонала в рамках общего для них технологического процесса, а также в условиях отсутствия предварительного инструктажа, вербальных и невербальных коммуникаций. *Реализация:* для гарнитуры



Рис. 3. Пример визуализации элементов содержания технической документации как интерактивного справочного контента поверх отладочной платы.

смешанной реальности HoloLens выполнена разработка клиент-серверного приложения, координирующего действия от 1 до 4 операторов при формировании задаваемых администратором и неизвестных им заранее последовательностей пиктограмм.

Технология проведения эксперимента:

1. Действия администратора с серверной частью приложения:

1.1. Выбирает одну из библиотек пиктограмм, обозначающих виды спорта, буквы алфавита, дорожные знаки и т.п.

1.2. Задаёт произвольную последовательность пиктограмм в количестве от 3 до 10, которую должны будут составить операторы.

1.3. Выбирает вариант размещения заданной последовательности пиктограмм (слева-направо, справа-налево, сверху-вниз, снизу-вверх и т.п.).

1.4. Указывает количество участвующих в эксперименте операторов и задаёт очередность распределения им задач по поэлементному составлению требуемой последовательности пиктограмм.

2. Действия операторов с гарнитурой смешанной реальности:

2.1. Подходят к поверхности, на которой размещены распечатки пиктограмм из выбранной администратором библиотеки, и осматривают их.

2.2. Соблюдают очередность выполнения распределяемых им задач в соответствии с индикацией устройством смешанной реальности режимов выполнения действий и ожидания.

2.3. Выбирают выделенные контентом среды смешанной реальности распечатки пиктограмм – либо перемещают их в обозначенный участок зоны сборки последовательности, либо убирают из него, если была допущена (в том числе преднамеренно) ошибка.

Выводы: результаты участия в эксперименте сотрудников и учащихся РТУ МИРЭА, а также посетителей выставок (VI ежегодная национальная выставка «ВУЗПРОМЭКСПО – 2019»,

Международная специализированная конференция по цифровизации экономики и промышленного бизнеса «FIT-M 2019», XXIII Международная выставка средств обеспечения безопасности государства «Интерполитех – 2019») показали, что в условиях отсутствия предварительного инструктажа, вербальных и невербальных коммуникаций, как знакомые с содержанием эксперимента так и люди, не ознакомленные с ним, могут совместно выполнить в роли операторов требующиеся от них и заранее им неизвестные последовательности действий.

На рис. 4а показан вид среды смешанной реальности для первого оператора, на рис. 4б приведен аналогичный вид для второго оператора, на рис. 4в представлен вид эксперимента для стороннего наблюдателя, а на рис. 4г – интерфейс администратора.



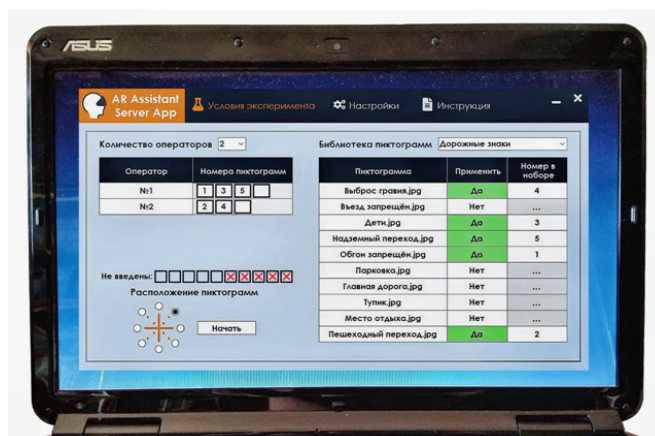
а



б



в



г

Рис. 4. Проведение эксперимента в среде смешанной реальности.

На основании результатов проведения описанных выше экспериментов по работе с интерактивными средами расширенной реальности авторами сделаны выводы о возможности адаптации лабораторного опыта их выполнения к реальным технологическим процессам, в том числе:

- опробованное в первом и втором экспериментах применение сред виртуальной реальности позволяет проводить подготовку сотрудников к монтажу, обслуживанию, ремонту, настройке и эксплуатации оборудования, в том числе в случаях, когда его вывод из технологического процесса возможен на ограниченное время, которое требуется минимизировать;

- реализованный в третьем эксперименте способ информационного обеспечения персонала контентом дополненной реальности, в случае достаточности задействованных вычислительных мощностей, может быть применим для информационной поддержки и сопровождения операторов любого уровня квалификации в любой предметной области;

- реализованный в четвертом эксперименте крайне упрощенный технологический процесс (сборка последовательности пиктограмм) на текущем этапе исследований обосновывает предоставляемые средами смешанной реальности возможности координации деятельности людей даже в условиях отсутствия возможностей проведения инструктажей, совещаний и т.п., а также вербальных и невербальных коммуникаций.

В следующих работах авторов для рассмотренных выше тренажеров и клиент-серверных приложений будет приведено подробное описание реализованных архитектурных решений и примененного инструментария. Имеющийся в настоящее время в данном направлении задел изложен в [48, 49].

Заключение

Технологии XR, обобщающие понятия виртуальной, дополненной и смешанной реальностей, могут применяться как новый компонент методологической базы производственной инженерии, позволяющий обеспечить универсальное решение задач информационной поддержки и сопровождения деятельности человека в технологических процессах производственных систем широкого спектра отраслей национальной экономики любого государства, вне зависимости от уровня их развития, а также долевого сочетания и доминирования технологических укладов.

В связи с этим, по мнению авторов, технологии расширенной реальности удовлетворяют определению как прорывной (нововведение, которое базируется на научном открытии или крупном изобретении и направлено на освоение принципиально новых продуктов и услуг, технологий новых поколений), так и улучшающей (нововведение, направленное на улучшение параметров производимых продуктов и используемых технологий, совершенствование продукции и технологических процессов) инновации [50]. При этом данные технологии фактически являются уникальным примером универсальной улучшающей инновации, имеющей типовое прикладное применение в технологических процессах и производственных системах различных отраслей национальной экономики.

Новый этап развития научно-технического прогресса ставит перед образовательными учреждениями высшего образования Российской Федерации задачи обеспечения соответствия содержания и уровня учебного процесса, а также научно-исследовательской

деятельности учащихся, современному уровню развития ключевых, в том числе цифровых технологий. В данном контексте освоение основ применения технологий расширенной реальности представляется авторам необходимой составляющей современного комплексного профессионального развития выпускников по инженерным направлениям подготовки.

Литература:

1. Глазьев С.Ю. Рывок в будущее. Россия в новых технологическом и мирохозяйственном укладах. М.: Книжный мир, 2018. 768 с. ISBN 978-5-6041071-1-9
2. Глазьев С.Ю. Стратегия опережающего развития России в условиях глобального кризиса. М.: Экономика, 2010. 255 с. ISBN 978-5-282-03056-3
3. Глазьев С.Ю. Теория долгосрочного технико-экономического развития. М.: ВлаДар, 1993. 310 с. ISBN 5-86209-003-7
4. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад. *Наука и жизнь*. 2010;4. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nkj.ru/archive/articles/17800/>
5. Salvendy G. Handbook of Industrial Engineering. Third edition. V. 3. New York: John Wiley & Sons Ltd., 2007. 2836 p. ISBN: 978-0470241820
6. Badiru A.B. Handbook of Industrial and Systems Engineering. Second edition. CRC Press LLC, 2013. 1476 p. ISBN: 978-1-4665-1504-8
7. Sassani F. Industrial Engineering Foundations: Bridging the Gap between Engineering and Management. Dulles: Mercury Learning & Information, 2016. 250 p. ISBN: 978-1942270867
8. Программа «Цифровая экономика Российской Федерации», утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 июля 2017 г. № 1632-р [Электронный ресурс]. URL: <http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf>
9. Шваб К. Четвертая промышленная революция: пер. с англ. М.: Эксмо, 2019. 209 с. ISBN 978-5-699-90556-0
10. Fast-Berglund A., Gong L., Li D. Testing and validating Extended Reality (xR) technologies in manufacturing. *Procedia Manuf.* 2018;25:31-38. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.054>
11. Глазьев С.Ю., Дементьев В.Е., Елкин С.В., Крянев А.В., Ростовский Н.С., Фирстов Ю.П., Харитонов В.В. Нанотехнологии как ключевой фактор нового технологического уклада в экономике, под ред. академика РАН С.Ю. Глазьева и профессора В.В. Харитонова. М.: Тривант, 2009. 304 с.
12. Садовничий В.А., Акаев А.А., Коротаев А.В., Малков С.Ю. Моделирование и прогнозирование мировой динамики / Научный совет по Программе фундаментальных исследований Президиума Российской академии наук «Экономика и социология знания». М.: ИСПИ РАН, 2012. 359 с. ISBN 978-5-7556-0456-7
13. Hermann M., Pentek T., Otto B. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios. In: 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), Koloa, HI. 2016. P. 3928-3937. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.488>
14. Going C.B. Principles of Industrial Engineering. New York: McGraw-Hill, 1911. 174 p.
15. Lehrer R.N. The Nature of Industrial Engineering. *The Journal of Industrial Engineering*. 1954;5(1):4.
16. Urwick L.F. Development of Industrial Engineering. In: Industrial Engineering Handbook, H.B. Maynard (Ed.). New York: McGraw Hill, 1963. P. 1.3-1.16.
17. Sawada P.N. A Concept of Industrial Engineering. *Int. J. Prod. Res.* 1977;15(6):511-522. <https://doi.org/10.1080/00207547708943146>
18. Savory P. Details and Description of Industrial Engineering. Industrial and Management Systems Engineering Faculty Publications. 2005. 13 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://digitalcommons.unl.edu/imsefacpub/33>
19. Darwish H., van Dyk L. The industrial engineering identity: from historic skills to modern values, duties, and roles. *S. Afr. J. Ind. Eng.* 2016;27(3):50-63. <https://doi.org/10.7166/27-3-1638>
20. Cupek R., Drewniak M., Ziębiński A., Fojcik M. «Digital Twins» for Highly Customized Electronic Devices – Case Study on a Rework Operation. *IEEE Access*. 2019;7:164127-164143. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2950955>
21. Casla P., Larreina J., Fletcher S. et al. Human-centered factories from theory to industrial practice. Lessons learned and recommendations. ACE Factories Cluster White Paper, 2019. 51 p. <http://ace-factories.eu/wp-content/uploads/ACE-Factories-White-Paper.pdf>
22. Внедрение и развитие Индустрии 4.0. Основы, моделирование и примеры из практики, под ред. Армина Рота. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2017. 294 с. ISBN 978-5-94836-482-7

23. Зуев А.С., Зуева А.Н. Цифровая экономика и развитие печатных изданий. *Изв. ВУЗов. Проблемы полиграфии и издательского дела*. 2019;1:50-56.
24. Sharp H., Preece J., Rogers Y. Interaction Design: Beyond Human-Computer Interaction. 5th ed. New York: John Wiley & Sons Ltd, 2019. 636 p. ISBN 978-1-119-54725-9
25. Дорожная карта развития «сквозной» цифровой технологии «Технологии виртуальной и дополненной реальности», утвержденная 10 октября 2019 года. [Электронный ресурс]. URL: <https://digital.gov.ru/ru/documents/6654/>
26. Foreman N., Korallo L. Past and Future Applications of 3-D (Virtual Reality) Technology. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2014;6(94):1-8.
27. Cipresso P., Giglioli I.A.C., Raya V.L.A., Riva G. The Past, Present, and Future of Virtual and Augmented Reality Research: A Network and Cluster Analysis of the Literature. *Frontiers in Psychology*. 2018;9: Article 2086. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02086>
28. Sangsu C., Jung K., Noh S.D. Virtual reality applications in manufacturing industries: Past research, present findings, and future directions. *Concurr. Eng. Res. Appl.* 2015;23(1):1-24. <https://doi.org/10.1177%2F1063293X14568814>
29. Yu F., Zhang J.-F., Zhao Y., Tan C., Luan R.-P. The Research and Application of Virtual Reality (VR) Technology in Agriculture Science. In: Li D., Zhao C. (Eds). *Computer and Computing Technologies in Agriculture III*. 2009. P. 546-550. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12220-0_79
30. Wang P. et al. A Critical Review of the Use of Virtual Reality in Construction Engineering Education and Training. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2018;15(6):Article 1204. <https://doi.org/10.3390/ijerph15061204>
31. Wolfartsberger J., Zenisek J., Sievi C. Chances and Limitations of a Virtual Reality-supported Tool for Decision Making in Industrial Engineering. *IFAC- PapersOnLine*. 2018;51(11):637-642. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.390>
32. Велигодский Д.В. Опыт использования тренажера-симулятора «Виртуальный осмотр места происшествия» в рамках спецкурса «Информационно-справочное обеспечение судопроизводства» для обучения юристов. Материалы VII Международной научно-практической конференции «Уголовное производство: процессуальная теория и криминалистическая практика». Симферополь, 2019. С. 14-15.
33. Папагианнис Х. Дополненная реальность. Все, что вы хотели узнать о технологии будущего. М.: Эксмо, 2019. 288 с. ISBN: 978-5-04-089971-5
34. Mourtzis D., Zogopoulos V., Xanthi F. Augmented reality application to support the assembly of highly customized products and to adapt to production rescheduling. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2019;105:3899-3910. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03941-6>
35. Boccaccio A. et al. Exploiting Augmented Reality to Display Technical Information on Industry 4.0 P&ID. In: Cavas-Martínez F. et al. (Eds.). *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing II. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham., 2019. P. 282-291. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12346-8_28
36. Mourtzis D., Zogopoulos V., Katagis I., Lagios P. Augmented Reality based Visualization of CAM Instructions towards Industry 4.0 paradigm: a CNC Bending Machine case study. *Procedia CIRP*. 2018;70:368-373. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.02.045>
37. Speicher M., Hall B.D., Nebeling M. What is Mixed Reality? In: Proc. of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Glasgow, Scotland, UK, 2019. Paper No: 537. P. 1-15. <https://doi.org/10.1145/3290605.3300767>
38. Wang X., Schnabel M.A. (Eds.). *Mixed Reality in Architecture, Design, and Construction*. Springer Science, 2009. 274 p. ISBN: 978-1-4020-9087-5
39. Wang X. (Ed.). *Mixed Reality and Human-Robot Interaction*. ISCA. V. 47. Springer Science, 2011. 175 p. ISBN: 978-007-0581-4
40. Shumaker R. (Ed.). *Virtual and Mixed Reality – Systems and Applications*. International Conference, Virtual and Mixed Reality 2011. Proceedings, Part II. Orlando, FL, USA, 2011. 455 p. ISBN 978-3-642-22023-4 <https://doi.org/10.1007/978-3-642-22024-1>
41. Rubio-Tamayo J.L. Extended Reality, Interactivity and Immersive 3D Environments: Literature Review and Projections. In: VII Congreso Internacional Ciudades Creativas. Universidad Tecnológica de Bolívar, Cartagena de Indias, Colombia; 2019. P. 396-414.
42. Mann S., Havens J.C., Iorio J., Yuan Y., Furness T. All Reality: Values, taxonomy, and continuum, for Virtual, Augmented, eXtended/MiXed (X), Mediated (X,Y), and Multimeditated Reality/Intelligence. Presented at the AWE 2018, Santa Clara, CA, USA. [Электронный ресурс]. URL: <http://wearcam.org/all.pdf>
43. Chuah S.H.-W. Why and Who Will Adopt Extended Reality Technology? Literature Review, Synthesis, and Future Research Agenda (December 13, 2018). [Электронный ресурс]. URL: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3300469>
44. Barfield W. *Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality*. 2nd Edition. Boca Raton: CRC Press, 2015. 739 p. ISBN: 978-1-4822-4351-2

45. Chuah S.H-W. Wearable XR-technology: literature review, conceptual framework and future research directions. *Int. J. Tech. Market.* 2019;13(3/4):205-259.
<https://doi.org/10.1504/IJTMKT.2019.104586>
46. Smart contact lens for augmented reality and methods of manufacturing and operating the same: Pat. KR20160037008A, South Korea. Appl. № KR1020140129517A; appl. 2014.09.26; publ. 2016.04.05.
URL: <https://patents.google.com/patent/KR20160037008A/en?q=lens&q=smart&assignee=samsung&oq=samsung+lens+smart>
47. Racat M., Capelli S. Haptic Sensation and Consumer Behaviour: The Influence of Tactile Stimulation in Physical and Online Environments. Springer: Palgrave Pivot, 2020. 125 p. ISBN: 978-3-030-36921-7
48. Зуев А.С., Болбаков Р.Г. О телекоммуникационных сервисах на основе технологий виртуальной реальности. *Российский технологический журнал.* 2017;5(6):3-10.
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2017-5-6-3-10>
49. Зуев А.С., Зуева А.Н., Леонов Д.А. Технологии дополненной реальности как новый источник конкурентных преимуществ продукции машиностроения. *Российский технологический журнал.* 2020;8(1):9-20.
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-9-20>
50. Акаев А.А., Садовничий В.А. О новой методологии долгосрочного циклического прогнозирования динамики развития мировой системы и России. Прогноз и моделирование кризисов и мировой динамики. М.: Изд-во ЛКИ, 2010. С. 5-69.

References:

1. Glaz'ev S.Yu. *Ryvok v budushchee. Rossiya v novykh tekhnologicheskoy i mirokhozyaistvennom ukladakh* (Jerk into the future. Russia in the new technological and world economic structures). Moscow: Knizhnyi mir; 2018. 768 p. (in Russ.). ISBN 978-5-6041071-1-9
2. Glaz'ev S.Yu. *Strategiya operezhayushchego razvitiya Rossii v usloviyakh global'nogo krizisa* (Strategy for the rapid development of Russia in the context of global crisis). Moscow: Ekonomika; 2010. 255 p. (in Russ.). ISBN 978-5-282-03056-3
3. Glaz'ev S.Yu. *Teoriya dolgosrochnogo tekhniko-ekonomicheskogo razvitiya* (Theory of long-term technical and economic development). Moscow: Vldar Publ.; 1993. 310 p. (in Russ.) ISBN 5-86209-003-7
4. Kablov E.N. Sixth technological structure. *Nauka i zhizn' = Science and life.* 2010;4. [Electronic resource]. (in Russ).
URL: <https://www.nkj.ru/archive/articles/17800/>
5. Salvendy G. Handbook of Industrial Engineering. Third edition. V. 3. New York: John Wiley & Sons Ltd.; 2007. 2836 p. ISBN: 978-0470241820
6. Badiru A.B. Handbook of Industrial and Systems Engineering. Second edition. CRC Press LLC; 2013. 1476 p. ISBN: 978-1-4665-1504-8
7. Sassani F. Industrial Engineering Foundations: Bridging the Gap between Engineering and Management. Dulles: Mercury Learning & Information; 2016. 250 p. ISBN: 978-1942270867
8. Programma «Tsifrovaya ekonomika Rossiiskoi Federatsii», utverzhennaya rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 28 iyulya 2017 g. № 1632-R (The program «Digital economy of the Russian Federation», approved by the order of the Government of the Russian Federation dated July 28, 2017 No. 1632-R [Electronic resource]. (in Russ).
URL: <http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf>
9. Shvab K. Chetvertaya promyshlennaya revolyutsiya (The fourth industrial revolution: trans. from Engl.). Moscow: Eksmo; 2019. 209 p. (in Russ.). ISBN 978-5-699-90556-0
10. Fast-Berglund A., Gong L., Li D. Testing and validating Extended Reality (xR) technologies in manufacturing. *Procedia Manuf.* 2018;25:31-38.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.054>
11. Glaz'ev S.Yu., Dement'ev V.E., Elkin S.V., Kryanev A.V., Rostovskii N.S., Firstov Yu.P., Kharitonov V.V. *Nanotekhnologii kak klyuchevoy faktor novogo tekhnologicheskogo uklada v ekonomike* (Nanotechnologies as a key factor of the new technological order in Economics, S.Yu. Glaz'ev, V.V. Kharitonov (Eds.). Moscow: Trovnt; 2009. 304 p. (in Russ).
12. Sadovnichii V.A., Akaev A.A., Korotaev A.V., Malkov S.Yu. Modelirovanie i prognozirovanie mirovoi dinamiki (Modeling and forecasting of world dynamics / Scientific Council for the Fund Program. research. Presidium of the Russian Academy of Sciences «Economics and sociology of knowledge»). Moscow: ISPI RAN Publ.; 2012. 359 p. (in Russ.). ISBN 978-5-7556-0456-7
13. Hermann M., Pentek T., Otto B. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios. In: 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), Koloa, HI. 2016. P. 3928-3937.
<https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.488>
14. Goig C.B. Principles of Industrial Engineering. New York: McGraw-Hill; 1911. 174 p.
15. Lehrer R.N. The Nature of Industrial Engineering. *The Journal of Industrial Engineering.* 1954;5(1):4.
16. Urwick L.F. Development of Industrial Engineering. In: Industrial Engineering Handbook, H.B. Maynard (Ed.). New York: McGraw Hill; 1963. P. 1.3-1.16.
17. Sawada P.N. A Concept of Industrial Engineering. *Int. J. Prod. Res.* 1977;15(6):511-522.
<https://doi.org/10.1080/00207547708943146>

18. Savory P. Details and Description of Industrial Engineering // Industrial and Management Systems Engineering Faculty Publications. 2005. 13 p. [Electronic resource].
URL: <https://digitalcommons.unl.edu/imsefacpub/33>
19. Darwish H., van Dyk L. The industrial engineering identity: from historic skills to modern values, duties, and roles. *S. Afr. J. Ind. Eng.* 2016;27(3):50-63.
<https://doi.org/10.7166/27-3-1638>
20. Cupek R., Drewniak M., Ziębiński A., Fojcik M. «Digital Twins» for Highly Customized Electronic Devices – Case Study on a Rework Operation. *IEEE Access.* 2019;7:164127-164143.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2950955>
21. Casla P., Larreina J., Fletcher S. et al. Human-centered factories from theory to industrial practice. Lessons learned and recommendations. ACE Factories Cluster White Paper; 2019. 51 p.
<http://ace-factories.eu/wp-content/uploads/ACE-Factories-White-Paper.pdf>
22. Vnedrenie i razvitie Industrii 4.0. Osnovy, modelirovanie i primery iz praktiki, pod red. Armina Rota (Introduction and development of Industry 4.0. Fundamentals, modeling and examples from practice, Armin Roth (Ed.). Moscow: TEKhNOSFERA Publ., 2017. 294 p. (in Russ). ISBN 978-5-94836-482-7
23. Zuev A.S., Zueva A.N. The digital economy and the development of print media. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy poligrafii i izdatel'skogo dela = Proceedings of the institutions of higher education. Issues of the graphic arts and publishing.* 2019;1:50-56 (in Russ.).
24. Sharp H., Preece J., Rogers Y. Interaction Design: Beyond Human-Computer Interaction. 5th ed. New York: John Wiley & Sons Ltd; 2019. 636 p. ISBN 978-1-119-54725-9
25. Dorozhnaya karta razvitiya «skvoznoi» tsifrovoy tekhnologii «Tekhnologii virtual'noi i dopolnennoi real'nosti», utverzhennaya 10 oktyabrya 2019 goda (Roadmap for the development of «end-to-end» digital technology «Virtual and augmented reality Technologies», approved on October 10, 2019. (in Russ). [Electronic resource].
URL: <https://digital.gov.ru/ru/documents/6654/>
26. Foreman N., Korralo L. Past and Future Applications of 3-D (Virtual Reality) Technology. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki = Sci. Tech. J. Inf. Technol. Mech. Opt.* 2014;6(94):1-8 (in Russ.).
27. Cipresso P., Giglioli I.A.C., Raya V.L.A., Riva G. The Past, Present, and Future of Virtual and Augmented Reality Research: A Network and Cluster Analysis of the Literature. *Frontiers in Psychology.* 2018;9: Article 2086.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02086>
28. Sangsu C., Jung K., Noh S.D. Virtual reality applications in manufacturing industries: Past research, present findings, and future directions. *Concurr. Eng. Res. Appl.* 2015;23(1):1-24.
<https://doi.org/10.1177%2F1063293X14568814>
29. Yu F., Zhang J.-F., Zhao Y., Tan C., Luan R.-P. The Research and Application of Virtual Reality (VR) Technology in Agriculture Science. In: Li D., Zhao C. (Eds). Computer and Computing Technologies in Agriculture III. 2009. P. 546-550.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-12220-0_79
30. Wang P. et al. A Critical Review of the Use of Virtual Reality in Construction Engineering Education and Training. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2018;15(6):Article 1204.
<https://doi.org/10.3390/ijerph15061204>
31. Wolfartsberger J., Zenisek J., Sievi C. Chances and Limitations of a Virtual Reality-supported Tool for Decision Making in Industrial Engineering. *IFAC- PapersOnLine.* 2018;51(11):637-642.
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.390>
32. Veligodskii D.V. *Experience in using the simulator «Virtual inspection of the scene » in the special course «Information and reference support of legal proceedings» for training lawyers. In: Materialy VII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Ugolovnoe proizvodstvo: protsessual'naya teoriya i kriminalisticheskaya praktika». Simferopol' (Proc. of the VII International scientific and practical conference «Criminal proceedings: procedural theory and criminalistic practice», Simferopol.); 2019. P. 14-15 (in Russ.).*
33. Papagiannis Kh. *Dopolnennaya real'nost'. Vse, chto vy khoteli uznat' o tekhnologii budushchego (Augmented reality. Everything you wanted to know about future technology).* Moscow: Eksmo; 2019. 288 p. (in Russ.). ISBN: 978-5-04-089971-5
34. Mourtzis D., Zogopoulos V., Xanthi F. Augmented reality application to support the assembly of highly customized products and to adapt to production re-scheduling. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2019;105:3899-3910.
<https://doi.org/10.1007/s00170-019-03941-6>
35. Boccaccio A. et al. Exploiting Augmented Reality to Display Technical Information on Industry 4.0 P&ID. In: Cavas-Martínez F. et al. (Eds.). Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing II. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham., 2019. P. 282-291.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-12346-8_28
36. Mourtzis D., Zogopoulos V., Katagis I., Lagios P. Augmented Reality based Visualization of CAM Instructions towards Industry 4.0 paradigm: a CNC Bending Machine case study. *Procedia CIRP.* 2018;70:368-373.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.02.045>
37. Speicher M., Hall B.D., Nebeling M. What is Mixed Reality? In: Proc. of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Glasgow, Scotland, UK, 2019. Paper No: 537. P. 1-15.
<https://doi.org/10.1145/3290605.3300767>

38. Wang X., Schnabel M.A. (eds.) *Mixed Reality in Architecture, Design, and Construction*. Springer Science; 2009. 274 p. ISBN: 978-1-4020-9087-5
39. Wang X. (Ed.). *Mixed Reality and Human-Robot Interaction*. ISCA. V. 47. Springer Science; 2011. 175 p. ISBN: 978-007-0581-4
40. Shumaker R. (Ed.). *Virtual and Mixed Reality – Systems and Applications*. International Conference, Virtual and Mixed Reality 2011. Proceedings, Part II. Orlando, FL, USA; 2011. 455 p. ISBN 978-3-642-22023-4 <https://doi.org/10.1007/978-3-642-22024-1>
41. Rubio-Tamayo J.L. Extended Reality, Interactivity and Immersive 3D Environments: Literature Review and Projections. In: VII Congreso Internacional Ciudades Creativas. Universidad Tecnológica de Bolívar, Cartagena de Indias, Colombia, 2019. P. 396-414.
42. Mann S., Havens J.C., Iorio J., Yuan Y., Furness T. All Reality: Values, taxonomy, and continuum, for Virtual, Augmented, eXtended/MiXed (X), Mediated (X,Y), and Multimediated Reality/Intelligence. Presented at the AWE 2018, Santa Clara, CA, USA. [Electronic resource]. URL: <http://wearcam.org/all.pdf>
43. Chuah S.H-W. Why and Who Will Adopt Extended Reality Technology? Literature Review, Synthesis, and Future Research Agenda (December 13, 2018). [Electronic resource]. URL: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3300469>
44. Barfield W. *Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality*. 2nd Edition. Boca Raton: CRC Press; 2015. 739 p. ISBN: 978-1-4822-4351-2
45. Chuah S.H-W. Wearable XR-technology: literature review, conceptual framework and future research directions. *Int. J. Tech. Market*. 2019;13(3/4):205-259. <https://doi.org/10.1504/IJTMKT.2019.104586>
46. Smart contact lens for augmented reality and methods of manufacturing and operating the same: Pat. KR20160037008A, South Korea. Appl. № KR1020140129517A; appl. 2014.09.26; publ. 2016.04.05. URL: <https://patents.google.com/patent/KR20160037008A/en?q=lens&q=smart&assignee=samsung&oq=samsung+lens+smart>
47. Racat M., Capelli S. *Haptic Sensation and Consumer Behaviour: The Influence of Tactile Stimulation in Physical and Online Environments*. Spriger: Palgrave Pivot; 2020. 125 p. ISBN: 978-3-030-36921-7
48. Zuev A.S., Bolbakov R.G. On prospects of development of telecommunication systems and services based on virtual reality technology. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2017;5(6):3-10 (in Russ). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2017-5-6-3-10>
49. Zuev A.S., Zueva A.N., Leonov D.A. Augmented reality technology as a new source of competitive strengths in engineering products. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(1):9-20 (in Russ). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-9-20>
50. Akaev A.A., Sadovnichii V.A. On a new methodology for long-term cyclical forecasting of the dynamics of the world system and Russia. In: *Prognoz i modelirovanie krizisov i mirovoi dinamiki* (Forecast and modeling of crises and global dynamics). Moscow: LKI Publishing House; 2010. P. 5-69 (in Russ.).

Об авторах:

Зуев Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, директор Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Макущенко Максим Александрович, программист специализированной учебно-научной лаборатории технологий мультимедиа Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Иванов Михаил Евгеньевич, заведующий специализированной учебно-научной лабораторией информационных технологий интернета вещей Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Меркулов Егор Сергеевич, программист специализированной учебно-научной лаборатории технологий мультимедиа Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the authors:

Andrey S. Zuev, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Maksim A. Makushchenko, Programmer of Specialized Educational and Scientific Laboratories of Multimedia Technologies, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Mikhail E. Ivanov, Head of the Specialized Educational And Scientific Laboratory of Information Technologies of the Internet of Things, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Egor S. Merkulov, Programmer of Specialized Educational and Scientific Laboratories of Multimedia Technologies, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Поступила: 29.04.2020; Получена после доработки: 08.06.2020; Принята к опубликованию: 06.07.2020.

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-4-66-78>



УДК 537.226.4

Влияние механических напряжений на доменную структуру монокристаллов многоосных сегнетоэлектриков (на примере титаната бария)

В.В. Бородина¹,
С.О. Крамаров^{2,@}

¹Институт водного транспорта имени Г.Я. Седова – филиал ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова», Ростов-на-Дону 344006, Россия

²Сургутский государственный университет, Сургут 628412, Россия

@Автор для переписки, e-mail: maoovo@yandex.ru

В данной обзорной статье обобщён материал многолетних исследований, посвящённых влиянию механических напряжений на доменную структуру многоосных сегнетоэлектриков на примере монокристаллов титаната бария (BaTiO_3). Со времени открытия сегнетоэлектрических свойств титаната бария в 1944 году этот материал стал предметом всестороннего исследования как первый практически важный и, пожалуй, наиболее известный сегнетоэлектрик. Доменная структура титаната бария является чувствительной к механическим напряжениям, возникающим и от простого одноосного сжатия, и от точечных воздействий локальной механической нагрузкой. Механические напряжения, действуя на сегнетоэлектрический кристалл, оказывают существенное влияние на его диэлектрические и пьезоэлектрические свойства, в частности, под влиянием механических напряжений возможны 90-градусные переключения доменов. Наиболее интересные экспериментальные результаты были получены при изучении упругопластических процессов в BaTiO_3 под действием локальных механических нагрузок. Обнаружены и изучены: напряжённо-деформированная область вокруг точки приложения нагрузки; «внутренний» 90-градусный домен, не выходящий ни на одну из поверхностей кристалла и не замыкающийся на других доменах; рост 90-градусных доменов под действием остаточных механических напряжений; рост трещин вдоль заряженных

90-градусных доменных границ. Введены термины «сегнетопластический эффект» (деформирование кристалла за счёт образования 90-градусных сегнетоэлектрических доменов) и «сегнетомеханический эффект» (образование и рост трещин по заряженным 90-градусным доменным границам). Была выдвинута и экспериментально подтверждена гипотеза о существенной роли кислородных вакансий в процессах 90-градусных доменных переориентаций. В частности, увеличение концентрации кислородных вакансий путём восстановительного отжига монокристаллов титаната бария создаёт более благоприятные условия для появления «внутреннего» 90-градусного домена под локальной механической нагрузкой. Изучение закономерностей формирования доменной структуры в сегнетоэлектрических кристаллах остаётся важной проблемой современного материаловедения.

Ключевые слова: сегнетоэлектрики, домены, внутренние механические напряжения, релаксация, внутреннее электрическое поле.

Для цитирования: Бородина В.В., Крамаров С.О. Влияние механических напряжений на доменную структуру монокристаллов многоосных сегнетоэлектриков (на примере титаната бария). *Российский технологический журнал*. 2020;8(4):66-78. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-4-66-78>

Effect of mechanical stresses on the domain structure of barium titanate single crystals

Veronika V. Borodina¹
Sergey O. Kramarov^{2,@}

¹*Sedov Water Transport Institute – the branch of Admiral Ushakov State Maritime University, Rostov-on-Don 344006, Russia*

²*Surgut State University, Surgut 628412, Russia*

@Corresponding author, e-mail: maoovo@yandex.ru

This review article summarizes the material of years of research on the impact of mechanical stresses on the domain structure of multiaxhetoelectrics using the example of barium titanium monocrystals. Since the discovery of the ferroelectric properties of barium titanate in 1944, this material has been the subject of comprehensive investigation as the first practically important and perhaps the most famous ferroelectric. The domain structure of barium titanate is sensitive to mechanical stresses arising both from simple uniaxial compression and from point impacts by local mechanical loading. Mechanical stress applied to a ferroelectric crystal may have a significant effect on dielectric and piezoelectric properties. In particular, 90-degree domain switching is possible under the influence of stresses. The most interesting experimental results are obtained in the study of elastoplastic processes in BaTiO₃ originating from local mechanical stresses. The following features are found and studied: development of strained region around the point of application of the load; “internal” 90-degree domain that does not extend to the crystal surfaces and does not close upon other domains; the growth of 90-degree domains under the influence of residual mechanical stresses; growth of cracks along charged 90-degree domain walls. The notions of “ferroplastic effect” (crystal deformation

due to the formation of 90-degree ferroelectric domains) and “ferromechanical effect” (crack formation and growth along charged 90-degree domain walls) are introduced. The hypothesis of a significant role of oxygen vacancies in the processes of 90-degree domain reorientation was put forward and experimentally confirmed. In particular, an increase in the concentration of oxygen vacancies by reducing annealing of barium titanate single crystals creates more favorable conditions for the appearance of an “internal” 90-degree domain under local mechanical load. The study of the mechanisms governing the formation of a domain structure in ferroelectric crystals remains an important problem of modern materials science.

Keywords: ferroelectrics, domains, internal mechanical stresses, relaxation, internal electric field.

For citation: Borodina V.V., Kramarov S.O. Effect of mechanical stresses on the domain structure of barium titanate single crystals. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = *Russian Technological Journal*. 2020;8(4):66-78 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-4-66-78>

Введение

Создание и исследование интеллектуальных материалов, то есть материалов, изменяющих свои свойства в результате различных внешних воздействий, является одним из наиболее перспективных направлений современной науки о материалах. Такие материалы, благодаря своей уникальной структуре и составу, могут выполнять «двойную или даже тройную функцию – собственно материала с требуемыми характеристиками, датчика на внешнее воздействие и, в некоторых случаях, устройства, «запрограммированного» на определенное поведение» [1]. К ним относятся: сплавы с «памятью формы», самовосстанавливающиеся, самосмазывающиеся и самоочищающиеся материалы, проводящие полимеры, магнитореологические и электрореологические жидкости, электрохромные материалы, гидрогели, пьезоэлектрические, электрострикционные и магнитострикционные материалы. И к этому же классу «умных» материалов со свойствами, реагирующими на внешние факторы, относятся сегнетоэлектрики, вещества, обладающие спонтанной электрической поляризацией, которая может быть обращена приложением внешнего электрического поля. Большая диэлектрическая проницаемость, высокий пьезомодуль, наличие петли диэлектрического гистерезиса, интересные электрооптические свойства обусловили широкое применение сегнетоэлектриков в радиоэлектронике, электроакустике, квантовой электронике, измерительной технике и многих других областях современной науки и техники. Титанат бария (BaTiO_3) – яркий представитель этого семейства, многоосный сегнетоэлектрик со структурой перовскита, обладающий фоторефрактивным и пьезоэлектрическим эффектом. Его открытие ознаменовало принципиально новый этап в исследовании сегнетоэлектричества, а возможности его практического применения далеко не исчерпаны. Поэтому, несмотря на большое количество публикаций, посвящённых титанату бария, исследования в данном направлении продолжаются и в настоящее время [2, 3]. С применением новых методов сканирующей зондовой микроскопии [3] стало возможным наблюдение доменной структуры сегнетоэлектрических материалов в наноразмерной области. Продолжается изучение электромеханических свойств тонких плёнок на основе BaTiO_3 [4], изучаются свойства композитных материалов на

основе наночастиц BaTiO_3 в полимерной матрице [5, 6]. В настоящей работе обобщается материал исследований, посвящённых влиянию механических напряжений на доменную структуру монокристаллов титаната бария.

История вопроса

Термин «сегнетоэлектричество» был предложен И.В. Курчатовым, который в 30-х годах XX в. провёл комплексные исследования сегнетовой соли и написал соответствующую монографию [7]. В настоящее время известно несколько десятков веществ, обладающих сегнетоэлектрическими свойствами, но титанат бария (BaTiO_3) вошёл в историю научных исследований как первый практически важный и, пожалуй, наиболее известный сегнетоэлектрик. Сегнетоэлектрические свойства BaTiO_3 были открыты в 1944 г. в Физическом институте им. П.Н. Лебедева Академии Наук СССР Б.М. Вулом и И.М. Гольдман и подробно описаны в работе А.В. Ржанова в 1949 году [8]. С этого времени материал был предметом пристального внимания. В 1973 году был издан сборник «Титанат бария» [9]. В сборник были включены основные доклады, заслушанные на семинаре, посвященном 25-летию открытия сегнетоэлектрических свойств титаната бария. В 1974 году была издана монография Э.В. Бурсиана «Нелинейный кристалл (титанат бария)» [10], в которой даётся теоретическое объяснение сегнетоэлектрических свойств особенностями его кристаллического строения. В 1986 году увидела свет монография «Процессы переключения в нелинейных кристаллах», автором которой является В.М. Рудяк [11]. В книге рассмотрены процессы перестройки доменной структуры и связанные с ними процессы реориентации спонтанной намагниченности, поляризованности и деформации в ферромагнетиках, сегнетоэлектриках и сегнетоэластиках, соответственно. Рассмотрена роль диэлектрической и сегнетоупругой вязкости в процессах переключения и гистерезисных явлениях. Значительная часть книги посвящена эффекту Баркгаузена в нелинейных кристаллах и его применению в качестве метода их исследования. И это далеко не полный перечень научных трудов по данной теме.

Доменная структура монокристаллов титаната бария

Все сегнетоэлектрики объединяет ряд характерных признаков. У них существует некоторая температура (точка Кюри, T_K) в окрестности которой при охлаждении самопроизвольно (спонтанно) в отсутствие внешнего электрического поля возникает электрическая поляризованность $\mathbf{P}_{\text{СП}}$. Направление вектора $\mathbf{P}_{\text{СП}}$ может быть изменено электрическим полем («переключение полем»). При охлаждении сегнетоэлектрика от $T > T_K$ возрастает диэлектрическая проницаемость по закону Кюри-Вейсса $\varepsilon = c/(T - T_K)$; при $T \approx T_K$ наблюдается максимум ε , а затем уменьшение с охлаждением при $T < T_K$ [12].

Сегнетоэлектрики при $T < T_K$ разбиваются самопроизвольно на отдельные области (электрические домены), отличающиеся друг от друга направлением вектора $\mathbf{P}_{\text{СП}}$. Под влиянием внешних воздействий (температура, электрическое поле, механическое напряжение) доменная структура может перестраиваться, то есть имеет место «динамика» доменов. Зарождению и росту доменов в титанате бария, условиям их существования, движению доменных стенок под действием электрического поля посвящено большое количество научных работ.

Появление вектора $\mathbf{P}_{\text{сп}}$ сопровождается спонтанной деформацией сегнетоэлектрика, связанной с изменением симметрии кристалла. В результате перехода в сегнетоэлектрическую фазу и образования доменной структуры сегнетоэлектрический кристалл по своей статистически усреднённой макросимметрии возвращается к симметрии исходной, параэлектрической фазы. Разбиваясь на домены, он стремится сохранить свою прежнюю форму [13]. Таким образом, помимо сегнетоэлектрических, титанат бария обладает также сегнетоэластическими свойствами, то есть является смешанным сегнетоэластиком. Согласно определению, данному в статье С.А. Гриднева, «сегнетоэластики – это особый класс кристаллических твердых тел, в которых при структурном фазовом переходе из более симметричной (параэластической) в менее симметричную (сегнетоэластическую) фазу спонтанно (самопроизвольно) возникает деформация кристаллической решетки относительно исходной» [14]. Поэтому доменная структура титаната бария является чувствительной к механическим напряжениям, возникающим и от простого одноосного сжатия, и от точечных воздействий локальной механической нагрузкой.

С начала массового выращивания кристаллов BaTiO_3 методом Ремейки из раствора в расплаве фторида калия (KF) [15] были проведены многочисленные исследования статистики и динамики доменной структуры [16].

При понижении температуры BaTiO_3 испытывает фазовый переход I рода из неполярной (кубической) параэлектрической фазы (или парафазы) в сегнетоэлектрическую (тетрагональную) фазу (или сегнетофазу) при температуре $T_{\text{к}} = 132^\circ\text{C}$ (для кристаллов, выращенных в расплаве KF обычно 120°C). Спонтанная поляризованность возникает вдоль одной из осей куба. Общий характер доменной структуры в сегнетоэлектрическом кристалле определяется симметрией кристалла в исходной неполярной фазе и симметрией сегнетоэлектрической фазы. В целом равновесная доменная структура должна удовлетворять условиям минимума полной свободной энергии кристалла, включающей в себя энергию упругих деформаций, энергию доменных стенок и энергию полей деполяризации. Согласно [17, 18], в сегнетоэлектриках возможно существование метастабильных доменных конфигураций, которые медленно переходят в стабильные за счёт движения доменных стенок, перераспределения дефектов, изменения условий экранирования и других факторов.

В тетрагональной фазе BaTiO_3 вектор спонтанной поляризованности $\mathbf{P}_{\text{сп}}$ может быть ориентирован вдоль одного из шести псевдокубических направлений типа [001]. Поэтому наряду с антипараллельными (180-градусными) доменами, у которых $\mathbf{P}_{\text{сп}}$ направлен вдоль одной кристаллографической оси («по» или «против») и при переходе через доменную стенку изменяет своё направление на 180° существуют также 90-градусные домены – при переходе через доменную стенку, разделяющую такие домены, вектор $\mathbf{P}_{\text{сп}}$ изменяет своё направление на 90° . У титаната бария домены с вектором спонтанной поляризованности, перпендикулярные наиболее развитым поверхностям пластинок, получили название с-доменов, а домены с $\mathbf{P}_{\text{сп}}$ параллельными этим поверхностям – а-доменов.

На рис. 1 изображены возможные типы доменных структур. На рис. 1а изображен с-доменный кристалл, а на рис. 1б и г – а-доменные кристаллы. В случае 1б 90-градусные домены пересекаются антипараллельными структурами. В случае 1е представлены 90-градусные клиновидные системы в а-доменном кристалле, а в случае 1д – а-доменные

клиновидные домены в с-доменном кристалле. На рис. 1в, е, з показаны схематически а-с-доменные кристаллы, а на рис. 1ж – пересечение одиночных а-доменов внутри с-доменного кристалла. Несмотря на большое количество предложенных методов наблюдения доменных структур [12], все основные данные могут быть получены с использованием эффекта двулучепреломления, а также по рельефу избирательного травления поверхности сегнетоэлектрического образца. При этом используются как оптические, так и электронные микроскопы (метод реплик).

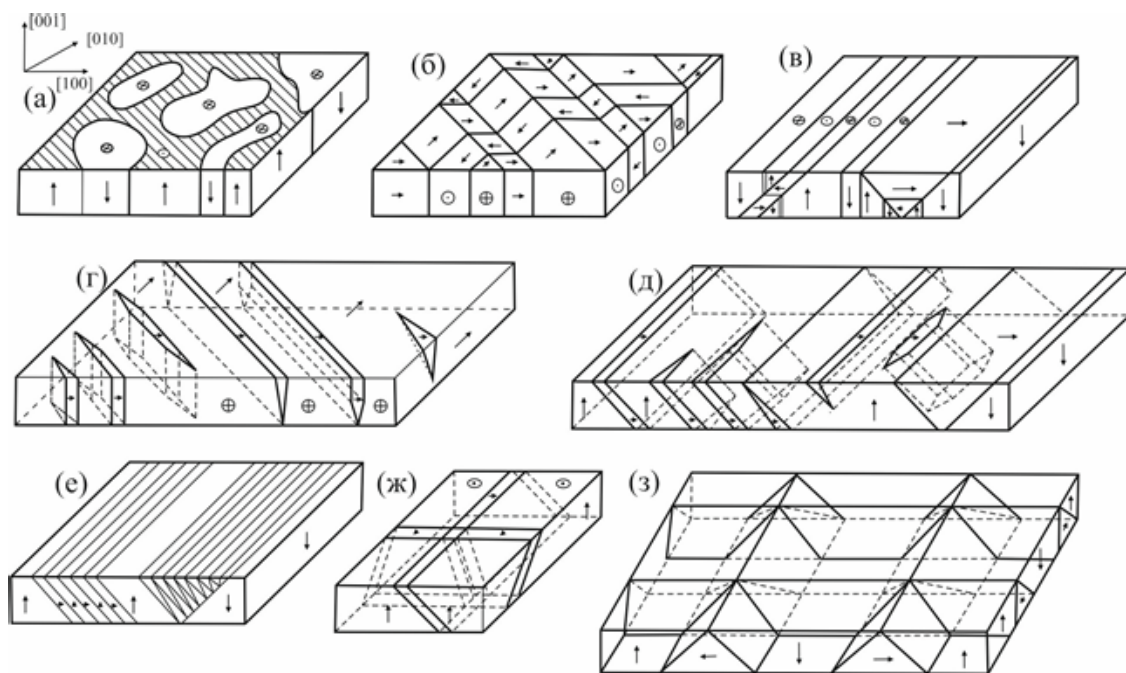


Рис. 1. Возможные типы доменных структур.

Очевидно, что появление клинообразных 90-градусных доменов обусловлено наличием неоднородных механических напряжений и направлено на минимизацию упругой энергии последних.

В тетрагональной фазе BaTiO_3 существуют два типа доменных границ: 180° стенки, разделяющие домены с антипараллельными направлениями спонтанной поляризованности $\mathbf{P}_{\text{сп}}$ и 90° стенки, при переходе через которые $\mathbf{P}_{\text{сп}}$ изменяет направление на 90° . Последние являются сегнетоэластическими, поскольку разделяемые ими домены имеют различно ориентированные системы спонтанных деформаций.

Возможность появления клиновидных а-доменов объясняется тем, что 90° стенки в объёмных образцах могут несколько отклоняться от «разрешённых» направлений. Действительно, в тетрагональной фазе 90° -градусная доменная стенка не является, строго говоря, 90° -градусной: при переходе через неё вектор спонтанной поляризованности изменяет направление на $89^\circ 24'$. В результате в окрестности 90° -градусной стенки наблюдаются неоднородные деформации (рис. 2), поверхность кристалла «сморщивается» [17, 19, 20], а при наличии серии клиновидных доменов отмечаются деформации изгиба (рис. 3). Неоднородные деформации отмечены при отражении рентгеновских лучей от поверхности а-с-доменных кристаллов по расширению дифракционного максимума и ослаблению интенсивности в максимуме в 2–5 раз [21]. Отсюда

следует, что 90-градусные границы в тетрагональном Ba-TiO_3 возникают в тех участках, где в парафазе либо при фазовом переходе существуют неоднородные механические напряжения. Появление 90-градусных доменов минимизирует поля неоднородных внутренних напряжений.

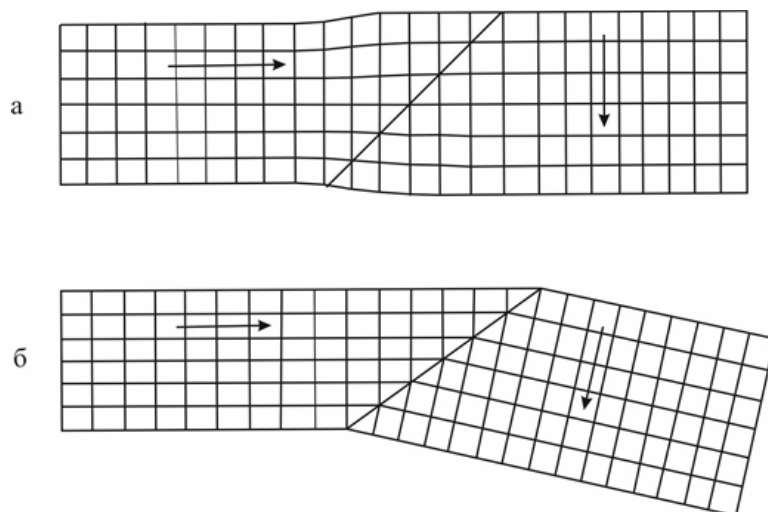


Рис. 2. Деформация кристалла титаната бария, обусловленная наличием в нём 90-градусной доменной стенки: а – переходной слой в окрестности 90-градусной стенки с пониженной тетрагональностью; б – излом свободного кристалла (36 минут) [19].

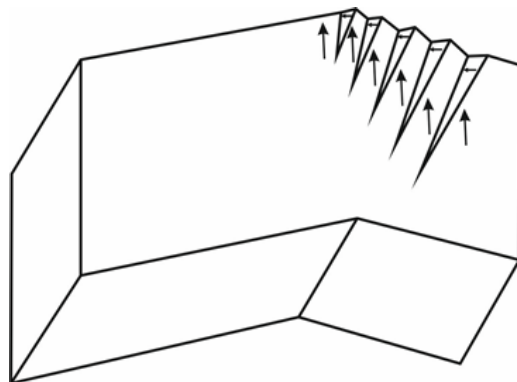


Рис. 3. Деформация сегнетоэлектрической пластинки, содержащей систему 90-градусных доменных клиньев [17].

Механические напряжения, действуя на сегнетоэлектрический кристалл, оказывают существенное влияние на его диэлектрические и пьезоэлектрические свойства. Если приложить к кристаллу внешнее механическое напряжение, которое направлено определенным образом, то спонтанные деформации, существующие в отдельных доменах, могут быть переориентированы. При достаточно больших значениях напряжения кристалл становится монодоменным, а его суммарная деформация достигает насыщения [14]. Наряду с ориентационными эффектами и эффектами искажения, механические напряжения приводят к изменению фазового состояния [20].

Согласно термодинамической теории титаната бария [29], под влиянием механических напряжений возможны 90-градусные переключения доменов. Критические напряжения сжатия вдоль направления $\mathbf{P}_{\text{сп}}$ (ось с) убывают с приближением к температуре Кюри. По-

этому с нагреванием кристаллов и происходит усложнение системы а-доменов как отражение внутренних механических напряжений. В сборнике, изданном к 25-летию открытия сегнетоэлектрических свойств у титаната бария [23], помещена статья Е.В. Синякова, посвящённая влиянию внешних воздействий на доменную структуру кристаллов BaTiO_3 . В частности, показано влияние одноосного механического сжатия. Рассмотрены два случая. В первом – на а-с-доменный кристалл накладывалось механическое сжатие перпендикулярно кристаллографической плоскости (001), наблюдения велись в этой плоскости. С ростом механического одномерного сжатия увеличивалось число а-доменов, пока весь кристалл не становился а-доменным (без сохранения направления пластинчатых а-доменов вдоль кристаллографического направления [100]. Однако при $\sigma_{33} > 7.4$ МПа наблюдалось появление и развитие поверхностной структуры 90-градусных клиньев, ориентированных вдоль кристаллографического направления $[\bar{1}\bar{1}0]$, по-видимому, обусловленное нарушением однородности давления за счёт неоднородности самого кристалла.

Во втором случае а-с-доменный кристалл сжимается вдоль кристаллографического направления [100] при ориентации линейчатых а-доменов вдоль кристаллографического направления [010], то есть, опять вдоль вектора $\mathbf{P}_{\text{сп}}$ в а-доменах. При увеличении давления наблюдалось исчезновение а-доменов; вектор спонтанной поляризованности ориентировался в направлении [001] – происходила с-доменизация кристалла. Однако одновременно с этим процессом начинал развиваться второй – появлялись а-домены с ориентацией $\mathbf{P}_{\text{сп}}$ вдоль кристаллографического направления [010] (при $\sigma_{11} > 3.3$ МПа).

Наиболее интересные экспериментальные результаты были получены при изучении упругопластических процессов в BaTiO_3 под действием локальных механических нагрузок. Сложный вид поля напряжений, возникающих в упругом полупространстве под действием нормальной сосредоточенной силы [24], особенно с учётом пьезоэффекта и граничных условий [25], приводит к появлению целого ряда интересных явлений. Источниками локальных механических нагрузок были как игла на пружине с регулируемым напряжением [26], так и алмазная четырёхгранная пирамидка, используемая в микротвердомере Виккерса [25, 27]. Объектами исследования были а- и с-монодоменные кристаллы различной толщины. В зависимости от величины приложенной нагрузки возможны следующие случаи, по мере её увеличения:

- Напряжённо-деформированная область вокруг точки приложения нагрузки. Возникает, если механические напряжения недостаточны для 90-градусных переориентаций. Она хорошо заметна в скрещенных поляроидах на с-доменных кристаллах в виде четырёх светлых лепестков.

- «Внутренний» 90-градусный домен, не выходящий ни на одну из поверхностей кристалла и не замыкающийся на других доменах [27]. Наблюдался в с-доменных кристаллах для минимальных критических значений механической нагрузки. Кинетика образования этого домена характеризуется стадией «скрытого» зарождения с характерным временем релаксации, причём логарифм времени релаксации линейно зависит от величины, обратной приложенной локальной нагрузке. Время релаксации существенно зависит от изменения механических граничных условий и полупроводниковых свойств кристалла.

- При дальнейшем увеличении механической нагрузки в с-доменном кристалле наблюдается образование а-доменных клиньев от одной из его поверхностей, которые растут

вглубь кристалла [26]. Скорость роста клина вглубь кристалла постепенно замедляется. В зависимости от величины напряжения и длительности его воздействия 90-градусная реориентация может иметь как обратимый, так и необратимый характер. Чем больше механическое напряжение и чем длительнее оно воздействовало, тем большая часть а-доменов не возвращается в исходное состояние после снятия напряжений. Устойчивыми становятся те а-домены, которые прорастают сквозь кристалл и из клиньев превращаются в параллелепипеды. Часто под локальной нагрузкой при её больших значениях образуется не одиночный а-домен, а система пересекающихся а-доменных клиньев.

– Процессы 90-градусной доменной переориентации могут происходить и под действием остаточных механических напряжений [28]. В данной работе описаны образующиеся при локальном деформировании с-доменных кристаллов а-домены в форме тонких дисков, уходящих вглубь кристалла. После снятия механической нагрузки а-доменные клинья релаксируют практически до нуля, а затем в течение 10 минут медленно растут под действием остаточных напряжений.

– Вдоль 90-градусных доменных границ возможен рост трещин, это явление было исследовано при индентировании а-доменных кристаллов BaTiO_3 [29]. Вследствие неоднородного характера деформирования на границах возникают одноимённые электрические заряды, которые способствуют росту трещин за счёт кулоновского отталкивания. Трещины медленно растут под действием остаточных напряжений, их рост замедляется при экранировании заряженных границ носителями зарядов. С этим связано торможение роста трещин фотоактивным освещением, а также его несимметричный характер (наличие основных и неосновных носителей заряда) [29].

Таким образом, под действием локальной механической нагрузки в кристаллах титаната бария наблюдаются сегнетопластический эффект (деформирование кристалла за счёт образования 90-градусных сегнетоэлектрических доменов) и сегнетомеханический эффект (образование и рост трещин по заряженным 90-градусным доменным границам) [29]. Эти эффекты чувствительны к воздействию фотоактивного освещения, обладают свойствами полярности и инверсии.

В ходе проведённых исследований была выдвинута и подтверждена экспериментально гипотеза «о роли кислородных вакансий в процессах экранирования заряженных доменных стенок при 90-градусных доменных переориентациях в с-доменных монокристаллах титаната бария. Восстановительный отжиг кристаллов в присутствии углерода, приводящий к увеличению концентрации кислородных вакансий, создаёт более благоприятные условия для появления «внутреннего» а-домена под локальной механической нагрузкой» [30, 31].

В последние годы активно развивается нанодоменная инженерия, основной задачей которой является создание в сегнетоэлектриках стабильных регулярных доменных структур на новом уровне, например, для изготовления эффективных преобразователей частоты когерентного излучения [32]. Возможно также более подробное изучение термодинамики доменных переориентаций по аналогии с изучением доменных границ в многослойных магнитных структурах [33]. В связи с этим изучение закономерностей формирования доменных структур в сегнетоэлектрических кристаллах и возможность управления ими остаётся важной проблемой материаловедения сегнетоэлектриков. Титанат бария по-прежнему является востребованным материалом для создания миниа-

тюрных приборов, теперь уже на новом наноуровне. Получены наночастицы титаната бария, отличающиеся улучшенными электрическими и механическими свойствами [6], они имеют сферическую форму, и при диаметре более 70 нм в них возникает доменная структура. Для изучения доменной структуры наночастиц, скорее всего, будут применяться методы сканирующей зондовой микроскопии, которые уже успешно применяются на кристаллах, выращенных «традиционным» методом Ремейки [2, 3].

Выводы

Сегнетоэлектрики являются одной из самых многочисленных, изученных и практически значимых групп современных интеллектуальных материалов. Титанат бария – наиболее яркий представитель семейства многоосных сегнетоэлектриков. Его применение в настоящее время не ограничивается использованием в качестве диэлектрика при изготовлении керамических конденсаторов или материала для пьезоэлектрических микрофонов и пьезокерамических излучателей. Одним из перспективных направлений изучения и использования этого материала является возможность управления его доменной структурой, которая является чувствительной к электрическим полям, механическим напряжениям и фотоактивному освещению. Особенно интересными являются новые эффекты, сегнетопластический и сегнетомеханический, открытые в монокристаллах титаната бария под действием локальной механической нагрузки. Такие кристаллы остаются «модельными» объектами для проведения аналогий и предсказания возможных закономерностей формирования и изменения доменной структуры сегнетоэлектрической керамики, тонких плёнок и даже сегнетоэлектрических наночастиц. Поэтому обзор научных результатов по влиянию механических напряжений на доменную структуру монокристаллов титаната бария может служить базой для дальнейших исследований.

Литература:

1. Кокцинская Е.М. «Умные» материалы и их применение (обзор). *Видеонаука: сетевой журн.* 2016;1. URL: <https://videonauka.ru/stati/13-tekhnicheskie-nauki/42-umnye-materialy-i-ikh-primeneniye-obzor>
2. Большакова Н.Н., Большакова О.В., Сергеева О.Н., Педько Б.Б., Бородина В.В., Некрасова Г.М. Кинетика доменных процессов в кристаллах титаната бария. Химическая термодинамика и кинетика. Сборник докладов VIII Международной научной конференции. Тверь: Тверской государственный университет, 2018. С. 75-76.
3. Киселев Д.А., Ильина Т.С., Малинкович М.Д., Сергеева О.Н., Большакова Н.Н., Семенова Е.М., Кузнецова Ю.В. Особенности поведения доменной структуры кристаллов BaTiO_3 в процессе термического нагрева и охлаждения. *Физика твёрдого тела.* 2018;60(4):734-738. <http://dx.doi.org/10.21883/FTT.2018.04.45684.01D>
4. Широков В.Б., Калинин В.В., Шаховой Р.А., Юзюк Ю.И. Материальные константы тонких пленок титаната бария. *Физика твердого тела.* 2015;57(8):1509-1514.
5. Емельянов Н.А., Чаплыгин А.А., Аль Мандалави В.М., Граби З.Х. Особенности фазового перехода в композитном материале на основе наночастиц BaTiO_3 с модифицированной поверхностью в матрице полистирола. «AUDITORIUM». *Электронный научный журнал Курского государственного университета.* 2014;4:1-4. URL: <http://auditorium.kursksu.ru/pdf/004-001>
6. Емельянов Н.А., Сизов А.С., Яковлев О.В. Структура и свойства наночастиц титаната бария, полученных термической обработкой пероксидного прекурсора. *Учёные записки. Электронный научный журнал Курского государственного университета.* 2013;4(28):1-5
7. Курчатов И.В. Избранные труды: в 3 т. Т.1 Сегнетоэлектричество. М.: Наука, 1982. 391 с.
8. Ржанов А.А. Титанат бария – новый сегнетоэлектрик. *Успехи физических наук.* 1949;XXXVIII(8):461-489. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0038.194908a.0461>
9. Титанат бария. М.: Наука, 1973. 264 с.
10. Бурсиан Э.В. Нелинейный кристалл. Титанат бария. М.: Наука, 1974. 295 с.

11. Рудяк В.М. Процессы переключения в нелинейных кристаллах. М.: Наука, 1986. 248 с.
12. Физика сегнетоэлектрических явлений, под ред. Г.А. Смоленского. Л.: Наука, 1985. 396 с.
13. Желудев И.Г., Шувалов Л.А. Ориентация доменов и макросимметрия свойств сегнетоэлектрических кристаллов. *Изв. АН СССР. Сер. физич.* 1957;21(2):264-274.
14. Гриднев С.А. Сегнетоэластические кристаллы: основные свойства, влияние дефектов. *Природа*. 2002;6:22-29.
URL: http://vivovoco.astronet.ru/VV/JOURNAL/NATURE/06_02/SEIGN.HTM
15. Remeika J.P., Jackson W.M. A Method for Growing Barium Titanate Single Crystals. *J. Amer. Chem. Soc.* 1954;76(3):940-941.
<https://doi.org/10.1021/ja01632a107>
16. Иона Ф., Ширане Д. Сегнетоэлектрические кристаллы. Монография. М.: Мир, 1965. 554 с.
17. Барфут Дж. Введение в физику сегнетоэлектрических явлений. М.: Мир, 1970. 278 с.
18. Burfoot Jack C. *Ferroelectrics. An introduction to the Physical Principles*. New York: Van Nostrand; 1967. 261 p.
19. Никифоров И.Я., Мальцев Ю.Ф., Бородин В.З. Исследование сегнетоэлектрических кристаллов на трехкристальном рентгеновском спектрометре. *Кристаллография*. 1973;18(5):1018-1022.
20. Bhide V.G., Barat N.J. Interferometric Study of the Microtopography Arising out of 90° Domain Walls in Single Crystals of Barium Titanate. *J. Appl. Phys.* 1963;34(1):181-188.
<https://doi.org/10.1063/1.1729063>
21. Forsbergh P.W. Jr. Domain Structures and Phase Transitions in Barium Titanate. *Phys. Rev.* 1949;76(8):1187-1201.
<https://doi.org/10.1103/PhysRev.76.1187>
22. Пикалев Э.М., Дорошенко В.А., Алёшин В.И. Фазовое состояние кристалла титаната бария при сильных механических напряжениях. Сегнетоэлектрики при внешних воздействиях. Л.: Изд. ФТИ АН СССР, 1981. С. 65-76.
23. Сняжков Е.В. Влияние внешних воздействий на доменную структуру и процессы поляризации монокристаллов титаната бария. В кн.: Титанат бария. М.: Наука, 1974. С. 50-59.
24. Колесников Ю.В., Морозов Е.М. Механика контактного разрушения. М.: Наука, 1989. С. 13-14.
25. Borodina V.V., Kramarov S.O., Madorsky V.V., Rozin L.G. Effect of the boundary conditions on the local deformation of BaTiO₃ crystals. *Ferroelectrics*. 1995;172:141-150.
<https://doi.org/10.1080/00150199508018467>
26. Богданов С.В. К вопросу о влиянии механической нагрузки на ориентацию доменов в монокристаллах BaTiO₃. *Кристаллография*. 1962;7(5):755-760.
27. Grekov A.A., Kramarov S.O., Borodina V.V. Dynamics of the local deformation of c-domain BaTiO₃ crystals. *Ferroelectrics*. 1994;160(1):165-176.
<https://doi.org/10.1080/00150199408007706>
28. Греков А.А., Крамаров С.О., Розин Л.Г., Англада Х. Влияние фотоактивного освещения на рост трещин в кристаллах BaTiO₃. *Кристаллография*. 1993;38(1):247-249.
29. Крамаров С.О., Бородин В.В., Шкондин И.А. Новые эффекты в многоосных сегнетоэлектрических кристаллах типа BaTiO₃ под воздействием локальных механических и электрических полей. *Известия Академии наук. Серия физическая*. 2000;64(6):1121-1128.
30. Приседский В.В. Кинетика релаксации кислородных вакансий в титанате бария. Химическая термодинамика и кинетика. Сборник докладов VII Международной научной конференции. Великий Новгород, 2017. С. 241-242.
31. Бородин В.В. К вопросу о влиянии кислородных вакансий на динамику доменной структуры в монокристаллах титаната бария. *Евразийское Научное Объединение*. 2020;3-1(61):17-20.
URL: <https://esa-conference.ru/wp-content/uploads/files/pdf/Borodina-Veronika-Viktorovna.pdf>
32. Стефанович Л.И., Мазур О.Ю. Формирование доменных структур в сегнетоэлектриках в сильнонеравновесных условиях под влиянием внешних воздействий. Дніпро: Середняк Т. К., 2019. 100 с. ISBN 978-617-7761-44-9.
URL: https://www.researchgate.net/publication/332802272_Formirovanie_domennyh_struktur_v_segnetoelektrikah_v_silnoneravnovesnyh_usloviyah_pod_vliyaniem_vnesnih_vozdejstvij
33. Морозов А.И., Сигов А.С. Новый тип доменных границ в многослойных магнитных структурах. *УФН*. 1999;169(8):922-924.
<https://doi.org/10.3367/UFNr.0169.199908h.0922>

References:

1. Koktsinskaya E.M. "Smart" materials and their application (review). Videonauka: setevoy zhurnal = Videonauka. 2016;1. (in Russ.).
URL: <https://videonauka.ru/stati/13-tekhnicheskie-nauki/42-umnye-materialy-i-ikh-primenenie-obzor>
2. Bol'shakova N.N., Bol'shakova O.V., Sergeeva O.N., Ped'ko B.B., Borodina V.V., Nekrasova G.M. Kinetics of domain processes in barium titanate crystals. In: *Khimicheskaya termodinamika i kinetika. Sbornik докладов VIII Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii*. (Chemical thermodynamics and kinetics. Collection of reports of the VIII International Scientific Conference). Tver': Tverskoi gosudarstvennyi universitet Publishing House; 2018. P. 75-76 (in Russ.).

3. Kiselev D.A., Ilina T.S., Malinkovich M.D., Sergeeva O.N., Bolshakova N.N., Semenova E.M., Kuznetsova Yu.V. Specific features of the domain structure of BaTiO₃ crystals during thermal heating and cooling. *Phys. Solid State*. 2018;60(4):738-742. <https://doi.org/10.1134/S1063783418040157>
4. Shirokov V.B., Kalinchuk V.V., Shakhovoi R.A., Yuzyuk Y.I. Material constants of barium titanate thin films. *Phys. Solid State*. 2015;57(8):1535-1540. <https://doi.org/10.1134/S1063783415080302>
5. Emelianov N.A., Chaplygin A.A., Al Mandalavi V.M., Grabi Z.H. Features of phase transition in composite material based on BaTiO₃ nanoparticles with modified surface in polystyrene matrix. «AUDITORIUM». *Elektronnyi nauchnyi zhurnal Kurskogo gosudarstvennogo universiteta* = «AUDITORIUM». *An electronic scientific journal of Kursk state University*. 2014;4:1-4 (in Russ.). URL: <http://auditorium.kursksu.ru/pdf/004-001>.
6. Emelianov N.A., Sizov A.S., Yakovlev O.V. Structure and properties of barium titanate nanoparticles obtained by heat treatment of a peroxide precursor. *Uchenye zapiski. Elektronnyi nauchnyi zhurnal Kurskogo gosudarstvennogo universiteta* = *Scientific notes. The online academic journal of Kursk state University*. 2013;4(28):5 p. (in Russ.).
7. Kurchatov I.V. *Izbrannye trudy v trekh tomakh. T. 1 Segnetoelektrichestvo* (Selected works in 3 v. V. 1 Ferroelectricity). Moscow: Nauka Publ.; 1982. 391 p. (in Russ.).
8. Rzhzanov A.V. Barium titanate is a new ferroelectric. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk* = *Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)*. 1949;38(8):461-489 (in Russ.). <https://doi.org/10.3367/UFNr.0038.194908a.0461>
9. *Titanat Bariya* (Barium titanate). Moscow: Nauka Publ.; 1973. 264 p. (in Russ.).
10. Bursian E.V. *Nelineinyi kristall. Titanat bariya* (Nonlinear crystal. Barium titanate). Moscow: Nauka Publ.; 1974. 295 p. (in Russ.).
11. Rudyak V.M. *Protsessy pereklyucheniya v nelineinykh kristallakh* (Switching processes in nonlinear crystals). Moscow: Nauka Publ.; 1986. 248 p. (in Russ.).
12. Smolenskii G.A. (Ed.). *Fizika segnetoelektricheskikh yavlenii* (Physics of ferroelectric effects). Leningrad: Nauka Publ.; 1985. 396 p. (in Russ.).
13. Zheludev I.G., Shuvalov L.A. The orientation of the domains and macrosymmetry of ferroelectric crystals. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Seriya fizicheskaya* = *Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Physical series*. 1957;21(2):264-274 (in Russ.).
14. Gridnev S.A. Ferroelastic crystals: basic properties, influence of defects. *Priroda* = *Nature*. 2002;6:22-29 (in Russ.). URL: http://vivovoco.astronet.ru/VV/JOURNAL/NATURE/06_02/SEIGN.HTM
15. Remeika J.P., Jackson W.M. A Method for Growing Barium Titanate Single Crystals. *J. Amer. Chem. Soc.* 1954;76(3):940-941. <https://doi.org/10.1021/ja01632a107>
16. Iona F., Shirane D. *Segnetoelektricheskie kristally* (Ferroelectric crystals). Moscow: Mir; 1965. 554 p. (in Russ.).
17. Burfoot Jack C. Ferroelectrics. An introduction to the Physical Principles. New York: Van Nostrand; 1967. 261 p.
18. Fousek J., Safrankova M. On the equilibrium domain structure of BaTiO₃. *Jap. J. Appl. Phys.* 1965;4(6):403-408. <https://doi.org/10.1143/JJAP.4.403>
19. Nikiforov I.Ya., Mal'tsev Yu.F., Borodin V.Z. Investigation of ferroelectric crystals on a three-crystal X-ray spectrometer. *Kristallografiya* = *Crystallography*. 1973;18(5):1018-1022 (in Russ.).
20. Bhide V.G., Barat N.J. Interferometric Study of the Microtopography Arising out of 90° Domain Walls in Single Crystals of Barium Titanate. *J. Appl. Phys.* 1963;34(1):181-188. <https://doi.org/10.1063/1.1729063>
21. Forsbergh P.W. Jr. Domain Structures and Phase Transitions in Barium Titanate. *Phys. Rev.* 1949;76(8):1187-1201. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.76.1187>
22. Pikalev E.M., Doroshenko E.M., Aleshin V.I. *Phase state of a barium titanate crystal under strong mechanical stresses*. In: *Segnetoelektriki pri vneshnikh vozdeistviyakh* (Ferroelectrics under external influences). Leningrad: FTI AN SSSR Publ.; 1981. P. 65-76 (in Russ.).
23. Sinyakov E.V. Influence of external influences on the domain structure and polarization processes of barium titanate single crystals. In: *Titanat Bariya* (Barium titanate). Moscow: Nauka Publ.; 1973. P. 50-59 (in Russ.).
24. Kolesnikov Yu.V., Morozov E.M. *Mekhanika kontaktного razrusheniya* (Contact fracture mechanics). Moscow: Nauka Publ.; 1989. P. 13-14 (in Russ.).
25. Borodina V.V., Kramarov S.O., Madorsky V.V., Rozin L.G. Effect of the boundary conditions on the local deformation of BaTiO₃ crystals. *Ferroelectrics*. 1995;172(1):141-150. <https://doi.org/10.1080/00150199508018467>
26. Bogdanov S.V. On the influence of mechanical load on the orientation of domains in BaTiO₃ single crystals. *Kristallografiya* = *Crystallography*. 1962;7(5):755-760 (in Russ.).
27. Grekov A.A., Kramarov S.O., Borodina V.V. Dynamics of the local deformation of c-domain BaTiO₃ crystals. *Ferroelectrics*. 1994;160(1):165-176. <https://doi.org/10.1080/00150199408007706>
28. Grekov A.A., Kramarov S.O., Rozin L.G., Jose Anglada-Rivera. Effect of photoactive lighting on crack growth in BaTiO₃ crystals. *Kristallografiya* = *Crystallography*. 1993;38(1):247-249 (in Russ.).

29. Kramarov S.O., Borodina V.V., Shkondin I.A. New effects in multiaxial ferroelectric crystals of BaTiO₃ type under the influence of local mechanical and electric fields. *Izvestiya Akademii nauk. Seriya fizicheskaya = Bulletin of Russian Academy of Science: Physics*. 2000;64(6):1121-1128 (in Russ.).
30. Prisedskii V.V. Relaxation kinetics of oxygen vacancies in barium titanate. In: *Khimicheskaya termodinamika i kinetika. Sbornik dokladov VII Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii*. (Chemical thermodynamics and kinetics. Collection of reports of the VII International Scientific Conference). Velikii Novgorod; 2017. P. 241-242 (in Russ.).
31. Borodina V.V. K voprosu o vliyani kislородnykh vakansiy na dinamiku domennoy struktury v monokristallakh titanata bariya. *Evrasijskoe Nauchnoe Ob''edinenie*. 2020;3-1(61):17-20 (in Russ.).
URL: <https://esa-conference.ru/wp-content/uploads/files/pdf/Borodina-Veronika-Viktorovna.pdf>
32. Stefanovich L.I., Mazur O.Yu. *Formirovanie domennykh struktur v segnetoelektrikakh v sil'noneravnovesnykh usloviyakh pod vliyaniem vneshnikh vozdeystviy* (Formation of domain structures in ferroelectrics under strongly nonequilibrium conditions under the influence of external influences). Dnipro: Serednyak T.K. Publ.; 2019. 100 p. (in Russ.). ISBN 978-617-7761-44-9.
URL: https://www.researchgate.net/publication/332802272_Formirovanie_domennykh_struktur_v_segnetoelektrikakh_v_sil'noneravnovesnykh_usloviyakh_pod_vliyaniem_vneshnikh_vozdeystviy
33. Morosov A.I., Sigov A.S. New type of domain boundaries in multilayer magnetic structures. *Phys. Usp.* 1999; 42(8):827-830.
<https://doi.org/10.1070%2FPU1999v042n08ABEH000586>

Об авторах:

Бородина Вероника Викторовна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики, естественнонаучных и общепрофессиональных дисциплин Института водного транспорта им. Г.Я. Седова, филиала Государственного морского университета им. адм. Ф.Ф. Ушакова (344006, Ростов-на-Дону, улица Седова, д. 8). <https://orcid.org/0000-0002-7142-333X>

Крамаров Сергей Олегович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Сургутского государственного университета (628412, Сургут, пр. Ленина, д. 1). <https://orcid.org/0000-0003-3743-6513>

About the authors:

Veronika V. Borodina, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), associate Professor of the Department of mathematics, natural science and general professional disciplines, Sedov Water Transport Institute - the branch of Admiral Ushakov State Maritime University (8, Sedov str., Rostov-on-Don 344006, Russia). <https://orcid.org/0000-0002-7142-333X>

Sergey O. Kramarov, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Chief Scientist of Surgut State University (1, Lenin Ave., Surgut 628412, Russia). <https://orcid.org/0000-0003-3743-6513>

Поступила: 01.06.2020; Получена после доработки: 15.06.2020; Принята к опубликованию: 06.07.2020

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-4-79-95>



УДК 004.434; 004.415.2

Проектирование электронных систем с использованием SystemC и SystemC–AMS

В.А. Алехин

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

@Автор для переписки, e-mail: alekhin@mirea.ru

Современные тенденции в проектировании электронных систем и устройств заключаются в применении встраиваемых систем на основе «систем на кристалле» (System-on-Chip (SoC)) или (СБИС СнК). В работе рассмотрены особенности проектирования электронных систем на кристалле с использованием языка проектирования и верификации SystemC. Для совместного проектирования и моделирования аппаратно-программного обеспечения цифровых систем представлены и обсуждаются семь уровней моделирования: исполняемая спецификация, отключенная функциональная модель, временная функциональная модель, модель на уровне транзакций, поведенческая аппаратная модель, точная аппаратная модель, модель регистровых передач. Изложена методология проектирования SystemC с функциональной проверкой, сокращающая сроки разработки. Показаны архитектура языка SystemC и его главные компоненты.

Рассмотрено расширение SystemC–AMS для аналоговых и смешанных аналого-цифровых сигналов и варианты его использования в проектировании электронных систем. Обсуждаются модели вычислений: временной поток данных (TDF), линейный поток сигналов (LSF) и электрические линейные сети (ELN). Представлена архитектура стандарта языка SystemC–AMS и приведены примеры его применения.

Показано, что языки проектирования SystemC и SystemC–AMS широко применяются ведущими разработчиками систем автоматизированного проектирования электронных устройств.

Ключевые слова: системы на кристалле, проектирование электронных систем, моделирование, SystemC, SystemC–AMS.

Для цитирования: Алехин В.А. Проектирование электронных систем с использованием SystemC и SystemC–AMS. *Российский технологический журнал*. 2020;8(4):79-95. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-4-79-95>

Designing Electronic Systems Using SystemC and SystemC-AMS

Vladimir A. Alekhin

MIREA - Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

@Corresponding author, e-mail: alekhin@mirea.ru

Current trends in the design of electronic systems is the use of embedded systems based on systems on a chip (System-on-Chip (SoC)) or (VLSI SoC). The paper discusses the design features of electronic systems on a chip using the SystemC design and verification language. For the joint design and simulation of digital systems hardware and software, seven modeling levels are presented and discussed: executable specification, disabled functional model, temporary functional model, transaction-level model, behavioral hardware model, accurate hardware model, register transfer model. The SystemC design methodology with functional verification is presented, which reduces development time. The architecture of the SystemC language and its main components are shown.

The expansion of SystemC-AMS for analog and mixed analog-digital signals and its use cases in the design of electronic systems are considered. Computing models are discussed: temporary data stream (TDF), linear signal stream (LSF) and electric linear networks (ELN). The architecture of the SystemC-AMS language standard is shown and examples of its application are given.

It is shown that the design languages SystemC and SystemC-AMS are widely used by leading developers of computer-aided design systems for electronic devices.

Keywords: systems on a chip, design of electronic systems, modeling, SystemC, SystemC-AMS.

For citation: Alekhin V.A. Designing Electronic Systems Using SystemC and SystemC-AMS. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(4):79-95 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-4-79-95>

Введение

В настоящее время широко развивается проектирование встраиваемых электронных систем на основе «систем на кристалле» (System-on-Chip (SoC)) или (СБИС СнК). Они содержат встроенный процессор (процессоры), аппаратные ускорители (или IP-ядра – Intellectual Property), встроенную память, коммуникационные интерфейсы и другие цифровые и аналоговые блоки. К устройствам на основе СнК предъявляют жесткие требования по стоимости, производительности, качеству, безопасности.

В последние несколько лет растет потребность в том, чтобы разместить традиционные микропроцессоры, память и периферийные устройства – все в одной микросхеме. Появление этой тенденции было отмечено как начало эпохи SoC и привело к разработке новых программных средств проектирования электронных устройств.

Целью данной работы является анализ возможностей перспективных средств проектирования систем на кристалле SystemC и SystemC-AMS. Эти вопросы обсуждаются в многочисленных работах зарубежных авторов и в работах автора [1, 2]. Для изучения методологии SystemC в [1] рассмотрены вопросы практического использования языка для моделирования сложных электронных систем на разных уровнях абстракции: системное описание, уровень транзакций, уровень регистровых передач и т.д. Изложена методика установки библиотек, дано подробное описание языка и многочисленные примеры программ с решениями в средах Eclipse и Microsoft Visual Studio.

Особенности проектирования системы на кристалле

Одна из ключевых задач проекта SoC – разбиение системной функциональности на аппаратное обеспечение (HW) и программное обеспечение (SW) или совместно HW/SW [3].

Сопряжённое или совместное проектирование аппаратуры и ПО, представляет собой процесс параллельной и скоординированной разработки, который называют «co-design».

В текущей методологии систем автоматизированного проектирования (САПР) делается априорное разделение на аппаратные и программные средства, и таким образом создаются отдельные аппаратные и программные спецификации. Изменения в разделении HW/SW требуют обширной реорганизации, которая обычно заканчивается неоптимальными проектами. Кроме того, при внедрении встроенных процессоров в ПЛИС (программируемые логические интегральные схемы) дизайнеры цифровых устройств знакомятся с новой областью САПР, которая включает в себя одновременную разработку как аппаратного, так и программного обеспечения (программа выполняется на встроенном процессоре).

Еще одним критическим недостатком текущей методологии САПР стало то, что она является RTL ориентированной (register transfer level) – в связи с увеличением сложности схемы время моделирования возрастает и постепенно становится неприемлемым.

Для сокращения времени разработки и затрат компьютерные инструменты проектирования (САПР) теперь должны включать проектирование на уровне абстракции электронной системы (ESL – Electronic System Level).

С этой целью Открытой инициативой SystemC (Open SystemC Initiative – OSCI) был введен Стандарт SystemC 2.0 [4]. В настоящее время распространяются версия SystemC-2.3.2, выпущенная в 2017 году [5], и SystemC-2.3.3 (2019 г.). Созданы новые расширения языка: SystemC-Verification-2.0 (библиотека для верификации систем) [6] и SystemC-AMS-2.0 [7, 8] (для моделирования систем с аналоговыми и смешанными сигналами).

Разработки языка SystemC спонсируют крупнейшие производители САПР для электроники: Synopsys, Mentor Graphics, Cadence.

SystemC является надстройкой языка C/C++ и содержит специальные библиотеки для моделирования HW.

В связи с быстро возрастающей сложностью конструкции и ростом стоимости ошибки или отказа разработчикам системы в большинстве областей продукции требуется подход проектирования сверху вниз, но с улучшенной методологией.

Несколько позже SystemC возникла методология моделирования на уровне транзакций (Transaction-level model – TLM), которая используется в SystemC [9, 10] и существенно повышает скорость моделирования на ранних этапах разработки.

Архитектура языка SystemC

SystemC обращается к моделированию программного и аппаратного обеспечения, используя язык C++. Диаграмма (рис. 1) иллюстрирует основные компоненты SystemC, которые базируются на стандартном языке C++. Поскольку C++ уже решает большинство задач программного обеспечения SystemC фокусируется прежде всего на проблемах, свя-

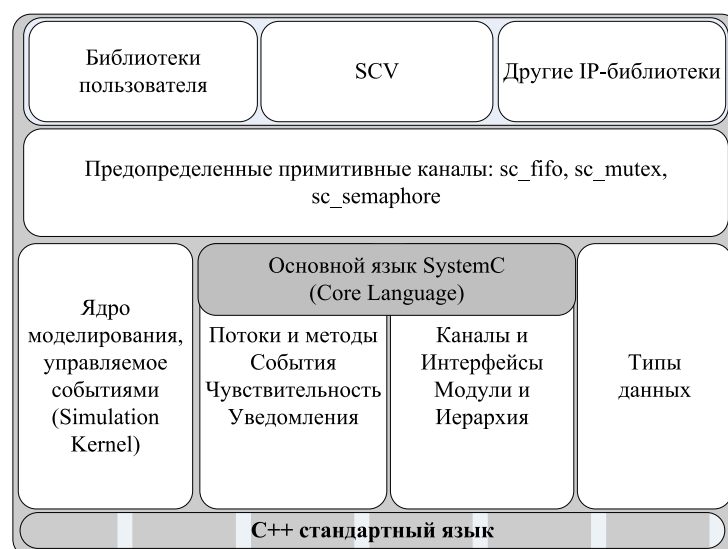


Рис. 1. Архитектура и главные компоненты языка SystemC.

занных как с программным обеспечением, так и с аппаратной реализацией. Основной областью применения SystemC является разработка электронных систем, но SystemC применяется к неэлектронным системам. Имеются публикации по моделированию электромеханических систем, датчиков, систем геологоразведки и пр.

Ядро моделирования (Kernel) и главная программа

Рассмотрим работу ядра моделирования Simulation Kernel.

Принцип работы ядра моделирования SystemC схож с языками VHDL и Verilog. При использовании Verilog и VHDL проходит некоторое время между инициализацией кода и началом моделирования. В SystemC, также как и в C/C++, есть строго определённая точка входа в программу. В случае SystemC – это главная программа `sc_main()`.

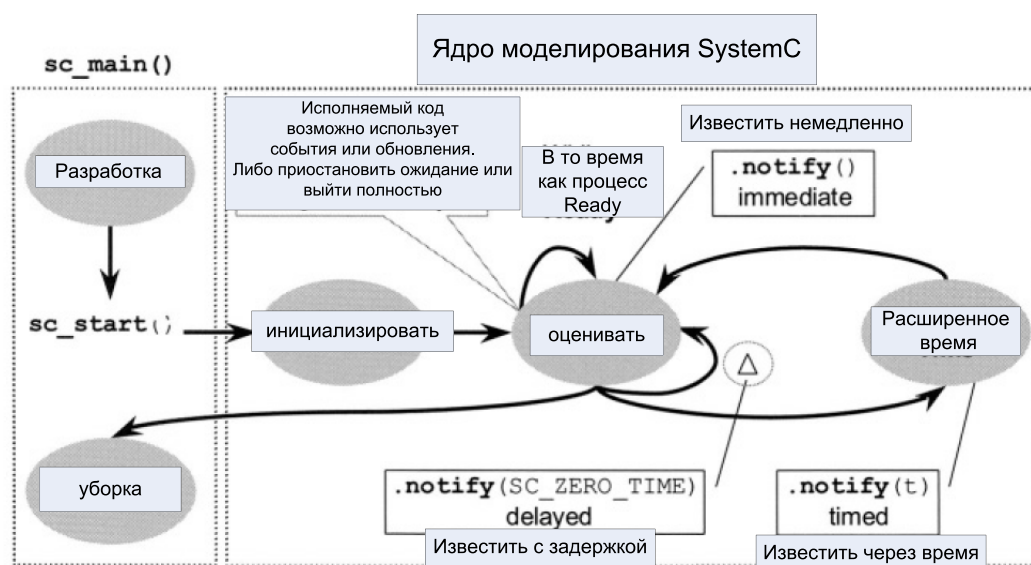


Рис. 2. Работа ядра моделирования SystemC.

Исполнение команд перед вызовом функции в `sc_start()` относится к этапу разработки. Эта фаза характеризуется инициализацией структур данных, установлением соединений, а также подготовкой ко второму этапу – выполнению. Контроль фазы выполнения передан ядру моделирования SystemC, которое руководит выполнением процессов, чтобы создать иллюзию параллелизма.

После команды `sc_start()` (рис. 2) все процессы моделирования (кроме нескольких исключений) вызываются случайным образом во время инициализации. После инициализации запускается процесс моделирования, когда происходит событие, к которому процесс чувствителен. Несколько процессов моделирования могут начаться в один и тот же момент времени в симуляторе. В связи с этим все процессы моделирования оцениваются, и затем их данные на их выходах обновляются. Оценки данных с последующим обновлением называются термином «дельта-цикл». Если нет никаких дополнительных процессов моделирования, которые следует оценить в настоящее время (в результате обновления), то время моделирования продвигается вперед. При этом, если не требуется запускать дополнительные процессы, когда отработаны все события, к которым чувствительны процессы, моделирование заканчивается.

Состав ядра языка SystemC (Core Language)

Ядро языка SystemC (Core Language), как показано на рис. 1, кроме ядра моделирования включает в себя следующие компоненты: модули, порты, процессы, события, интерфейсы, каналы. Эти компоненты оперируют с различными типами данных, как правило, аналогичными языку C++.

Основные понятия ядра языка SystemC классифицируются по следующей терминологии:

Основные термины

Method	Метод C++, функция член класса
<i>Module</i>	Конструктивный субъект, который может содержать процессы, порты, каналы и другие модули. Модули позволяют выразить структурную иерархию
<i>Interface</i>	Интерфейс предоставляет набор объявлений методов, но не дает никаких реализаций метода и нет полей данных
<i>Channel</i>	Канал реализует один или несколько интерфейсов, а также служит в качестве контейнера для функциональных возможностей связи
<i>Port</i>	Порт представляет собой объект, через который модуль может получить доступ к его каналу через интерфейс. Модули могут также получить доступ к интерфейсу канала напрямую
<i>Primitive Channel</i>	Примитивный канал является атомарным, он не содержит процессы или модули, и он не может непосредственно получить доступ к другим каналам
<i>Hierarchical Channel</i>	Иерархический канал представляет собой модуль, он может содержать процессы и другие модули, и он может непосредственно получить доступ к другим каналам
<i>Event</i>	Событие. Процесс может приостанавливаться событием или быть чувствительным к одному или нескольким событиям. События позволяют возобновить и активизировать процессы
<i>Sensitivity</i>	Чувствительность процесса определяет, когда этот процесс будет возобновлен или активирован. Процесс может быть чувствительным к набору событий. Всякий раз, когда одно из соответствующих событий инициируется, процесс возобновляется или активизируется
<i>Static Sensitivity</i>	Чувствительность процесса объявляется статически во время разработки и не может быть изменена после начала моделирования. Так называемый список чувствительности используется для определения статического набора событий
<i>Dynamic Sensitivity</i>	Чувствительность процесса может быть изменена во время моделирования
<i>IMC</i>	Метод вызова интерфейса
<i>RPC</i>	Удаленный вызов процедур

Терминология процессов

Процессы играют центральную роль в SystemC. Они описывают функциональные возможности системы и позволяют выразить параллелизм в системе. Процессы содержатся в модулях и имеют доступ к интерфейсам внешнего канала через порты модуля. Существуют различные типы процессов и различные способы активации процессов. Объясним термины, связанные с процессами.

<i>Thread</i>	Поток SystemC имеет свой собственный поток исполнения, но он не является упреждающим
<i>Automatically activated</i>	Некоторые методы модуля (процессы) активируются автоматически, когда происходят события, к которым процессы чувствительны
<i>Explicitly activated</i>	Некоторые методы модуля, которые должны быть вызваны явно другим кодом, чтобы активироваться
<i>wait()</i>	Метод, который приостанавливает выполнение потока. Аргументы, передаваемые wait(), определяют, когда выполнение потока возобновляется
<i>SC_THREAD</i>	Модуль-способ, который имеет свой собственный поток исполнения и который может вызвать код, инициирующий ожидание (). SC_THREADS автоматически активируются. Также известен как процесс потока
<i>SC_METHOD</i>	Модуль метод, который не имеет своего собственного потока исполнения, и который не может вызвать код, инициирующий wait(). SC_METHODs автоматически активируется. Также известен как процесс метода
<i>SC_CTHREAD</i>	Модуль метод, который имеет свой собственный поток исполнения и который в его списке чувствительности имеет только положительное или отрицательное событие по фронту тактового импульса. Он может вызвать код wait() с ограниченным списком аргументов. SC_CTHREADs активируется автоматически. Также известен как процесс с тактовой частотой

Следующей более высокой надстройкой являются понятия элементарных каналов.

На вершине архитектуры языка SystemC добавлены более специфические модели вычислений, библиотеки проектирования, руководства по моделированию, методология проектирования, которые полезны при проектировании.

Нижний слой подчеркивает то, что SystemC создан полностью на языке C++. Это означает, что любая программа, написанная на SystemC, может быть преобразована компилятором C++ в исполняемую программу.

Модули SC_MODULE

Основной единицей проектирования является модуль SC_MODULE.

Сложные системы состоят из множества независимо функционирующих компонентов. Они могут представлять собой аппаратные средства, программное обеспечение или любой объект, могут быть большими или маленькими. Компоненты часто содержат иерархии более мелких. Самые маленькие компоненты представляют поведение и состояние. В SystemC для представления компонентов используют концепцию, известную как SC_MODULE.

Определение: Модуль – это конструктивный субъект, который может содержать процессы, порты, каналы и другие модули. Модули позволяют выразить структурную иерархию.

Модуль SystemC является самым маленьким контейнером функциональности с состоянием, поведением и структурой для иерархического подключения.

Модуль SystemC соответствует определению класса C++. Как правило, макрос SC_MODULE используется для объявления класса:

```

#include <systemc.h>
SC_MODULE(Adder) {
    //Тело модуля
    //порты, процессы, внутренние данные и т.д.
    SC_CTOR(Adder){
        //Тело конструктора
        //объявление процессов, чувствительностей и т.д.
    }
};

```

Отметим, что SC_MODULE – это простой макрос C++ и на языке C++ его можно определить так:

```

#define SC_MODULE (module_name)
struct module_name: public sc_module

```

Модуль является старшим в иерархии элементов SystemC. Наличие модуля позволяет строить SystemC модели в соответствии с имеющимися у разработчиков аппаратуры представлениями (документацией) об архитектуре и функционировании будущего изделия. Обычно каждый отдельно взятый модуль представляет в модели функционально законченный узел разрабатываемого изделия.

Модули объявляются с ключевым словом SC_MODULE.

На рис. 3 изображён модуль, который включает в себя несколько процессов.

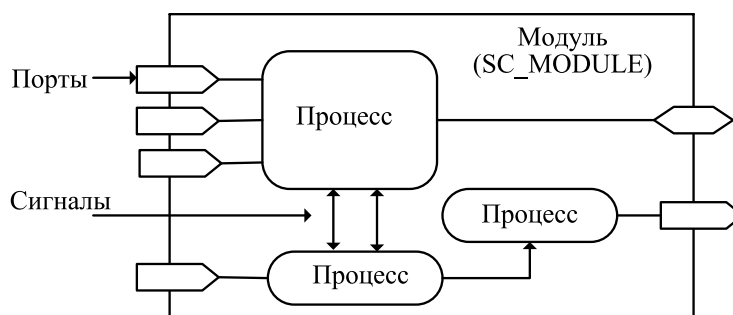


Рис. 3. Модуль, содержащий несколько процессов.

Структура модуля

```

// Заголовочный файл
SC_MODULE(module_name) {
    Объявление портов
    Объявление локальных каналов
    Объявление переменных
    Объявление процессов
    Объявление других методов

```

```

Конкретизации модуля
SC_CTOR(module_name){

```

```

    Регистрация процесса
    Лист статической чувствительности
    Инициализация переменных модуля
    Связывание экземпляра модуля / канала}
};
    
```

Коммуникации в SystemC

Рассмотрим способы подключения портов, каналов, модулей и процессов. Диаграмма (рис. 4) иллюстрирует типы соединения, которые возможны с SystemC.

Вначале рассмотрим фрагменты по имени, а затем обсудим правила их взаимосвязи.

Имеется три модуля, изображенные прямоугольниками. Внешний охватывающий экземпляр модуля имеет имя top. Два экземпляра подмодуля внутри top называются M1 mi1 и M2 mi2.

Каждый из модулей имеет один или несколько портов, представленных квадратами p. Портами модуля top являются p1, p2, p3, p4, p5 и p6, которые используют интерфейсы с именами if1, if2, if3, if4, if5 и if6, соответственно.

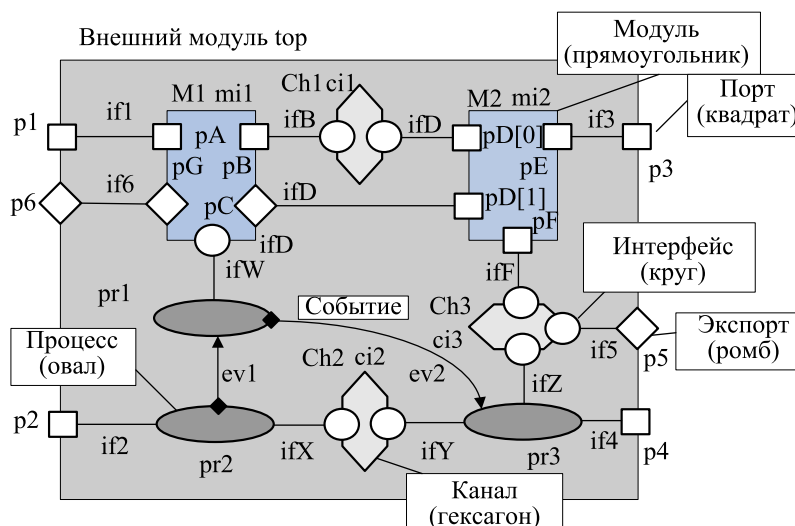


Рис. 4. Возможности подключения портов, каналов, модулей и процессов.

Портами для модуля M1 mi1 являются pA, pB, pC и pG, которые подключены к интерфейсам, названным if1, ifB, ifD и if6, соответственно.

Модуль M1 mi1 также предоставляет интерфейсы ifW и if6.

Порты для модуля M2 mi2 представляют собой pD[0], pD[1], pE и pF, которые подключены к интерфейсам с именами if3, ifD и ifF, соответственно. Имеется три экземпляра каналов, представленных гексагональными формами, они существуют внутри модуля top и называются c1i, c2i и c3i. Каждый канал реализует один или несколько интерфейсов, представленных кружками и стрелками. Стрелка предназначена для указания возможности вызова, возвращающего значение. Канал c1i реализует интерфейсы ifB и ifD. Канал c2i реализует интерфейсы ifX и ifY. Канал c3i реализует интерфейсы if5, ifF и ifZ.

Существуют три процесса с именами pr1, pr2 и pr3. Есть два явных события ev1 и ev2, используемые для сигнализации между процессами. На диаграмме рис. 4 можно

наблюдать несколько правил. Процессы могут связываться с процессами:

- на том же уровне через каналы, через синхронизацию, через события;
- вне локального модуля проектирования через порты, привязанные к каналам посредством интерфейсов;
- в экземплярах подмодулей через интерфейсы к каналам, подключенным к подмодулю портов или посредством интерфейсов через сам модуль `sc_export`; любая другая попытка межпроцессного общения либо запрещена, либо опасна и приводит к ошибкам.

Порты могут подключаться через интерфейсы только к локальным каналам, портам подмодулей или косвенно к портам процессов. Есть несколько интересных особенностей. Во-первых, модуль экземпляр `m1` реализует интерфейс `ifW`. Во-вторых, порт `pD` представляется массивом размера 2. Наконец, порт `p5` и порт `pC` иллюстрируют `sc_export`.

Уровни моделирования в SystemC

В SystemC используют семь уровней моделирования [11], представленных на рис. 5.

Аппаратная часть и ПО	Executable specification Исполняемая спецификация
	Untimed functional model Отключенная функциональная модель
	Timed functional model Временная функциональная модель
	Transaction-level model Модель на уровне транзакций
Аппаратная часть	Behavioral hardware model Поведенческая аппаратная модель
	Pin-accurate, cycle-accurate model Точная аппаратная модель
	Register transfer level model Модель регистровых передач

Рис. 5. Уровни моделирования в SystemC.

1. **Executable specification** (исполняемая спецификация) прямо передаёт спецификацию проекта в SystemC. Временные задержки учитываются в исполняемой модели.

2. **Untimed functional model** подобна предыдущей, но временные задержки не присутствуют в модели.

3. **Timed functional model** применяют на ранних стадиях анализа аппаратного и программного обеспечения. Задержки добавлены к процессам и отражают особенности функционирования модели.

4. **Transaction-level model (TLM)**. В этой модели связи между модулями смоделированы с использованием функций вызовов.

Термин **platform transaction-level model** показывает, что модель использует TLM стиль с целью моделирования инфраструктурных связей в платформе SoC. Этот метод является более качественным, точным и эффективным путём моделирования взаимосвязи HW и SW на самом раннем этапе проектирования.

Модели для аппаратной части:

5. **Behavioral hardware model** – модель, имеющая контактную и функциональную точность на границах. Тактовая точность на границах не учитывается. Эта модель может использоваться как входная для средств поведенческого синтеза.

6. *Pin accurate, cycle accurate hardware model* – модель обеспечивает контактную и тактовую точность на границах в дополнение к функциональной точности. Для модели не требуется внутренняя структура, которая влияет на целевую реализацию.

7. *Register transfer level (RTL) model* имеет на своих границах контактную и тактовую точность. Внутренняя структура RTL модели точно отражает регистры и комбинационную логику целевой реализации.

Методология проектирования SystemC

Типичную методологию моделирования в среде SystemC представлена рис. 6.

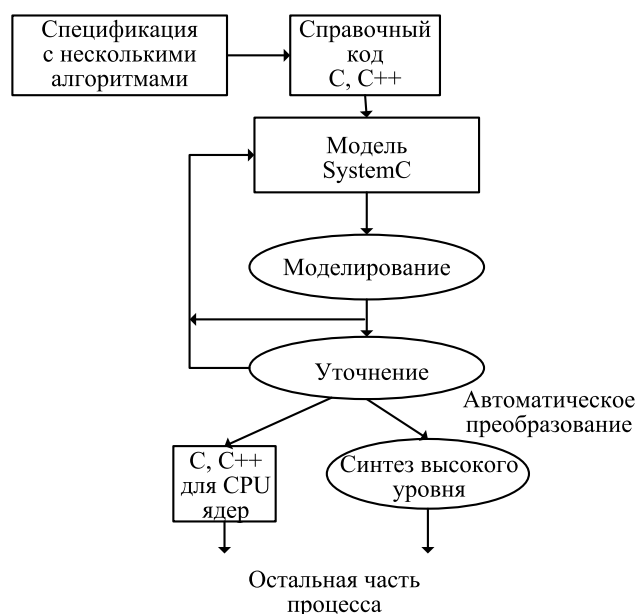


Рис. 6. Методология проектирования в SystemC.

Дизайнер пишет модели SystemC на системном, поведенческом уровне или на уровне RTL с использованием C/C++ с библиотекой классов SystemC. Библиотека классов обслуживает две важные цели. Во первых, возможность реализации многих типов объектов, которые зависят от аппаратного обеспечения, такие как параллельные и иерархические модули, порты и такты. Во-вторых, она содержит ядро для планирования процессов. Пользовательский код SystemC можно скомпилировать и связать вместе с библиотекой классов с любым стандартным компилятором C++ (например, GNU GCC). Полученный исполняемый файл служит симулятором пользовательского дизайна.

Испытательный стенд для проверки правильности конструкции также будет написан в SystemC и скомпилирован вместе с проектом.

Исполняемый файл может быть отлажен в любой среде отладки C++. Кроме того, файлы трассировки также могут генерироваться для просмотра истории выбранных сигналов с использованием стандартного инструмента отображения формы сигнала.

Поскольку SystemC – это надстройка к C++, у него есть ряд неотъемлемых свойств, таких как классы, шаблоны и наследование, которые поддаются проверке. Эти возможности дополняются SystemC Verification Library (SCV) [12], что делает SystemC мощным языком проверки, а также языком моделирования.

Использование SystemC для RTL синтеза устройств

SystemC компилятор синтезирует SystemC RTL-модули или проекты с интегрированными RTL- и поведенческими модулями в список соединений на уровне затворов. Он также может синтезировать системный модуль SystemC в RTL или Netlist. После синтеза вы можете использовать этот список соединений в качестве входных данных для других инструментов компании Synopsys, такие как Design Compiler и Physical Compiler.

Технология Synopsys дает усовершенствованные кремниевые чипы, которые являются более умными благодаря специальному программному обеспечению, которое ими управляет, и помогает заказчикам внедрять инновации.

SystemC Compiler – это инструмент, который может принимать как поведенческие, так и RTL-модели SystemC и выполнять поведенческий или RTL-синтез, так как необходимо создать список соединений на уровне затворов. На рис. 7 показаны процессы поведенческого синтеза и RTL-синтеза для описания на уровне затворов с помощью SystemC Compiler.

Высокоуровневая система SystemC может содержать абстрактные порты, типы которых не могут быть переведены на оборудование. Для каждого абстрактного порта необходимо определить порт или набор портов для замены каждого терминала абстрактного порта и заменить все обращения к абстрактному порту или терминалу с доступом к вновь определенным портам.

Для компилятора SystemC требуется иметь описание SystemC RTL, технологическую библиотеку и синтетическую библиотеку.

На рис. 8 показан процесс синтеза в компиляторе SystemC и выход из него.

Описание SystemC RTL проводят, используя SystemC Class Library. Технологическая библиотека предоставляется поставщиком ASIC в Synopsys .db Format базы данных. Поставщик предоставляет области, сроки, модели загрузки соединений и условия эксплуатации.

Синтетическая библиотека является технологически независимой библиотекой логики и включает такие компоненты, как сумматоры и множители. Компилятор SystemC сопоставляет проектные операторы с синтетической библиотекой логических компонентов.

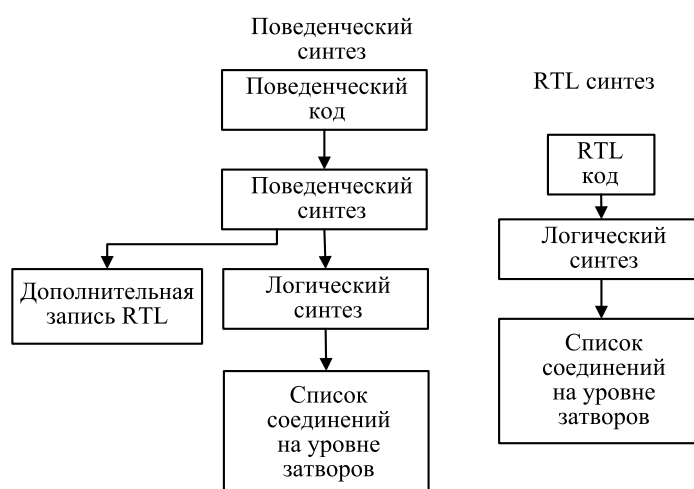


Рис. 7. Сравнение поведенческого синтеза и RTL-синтеза.

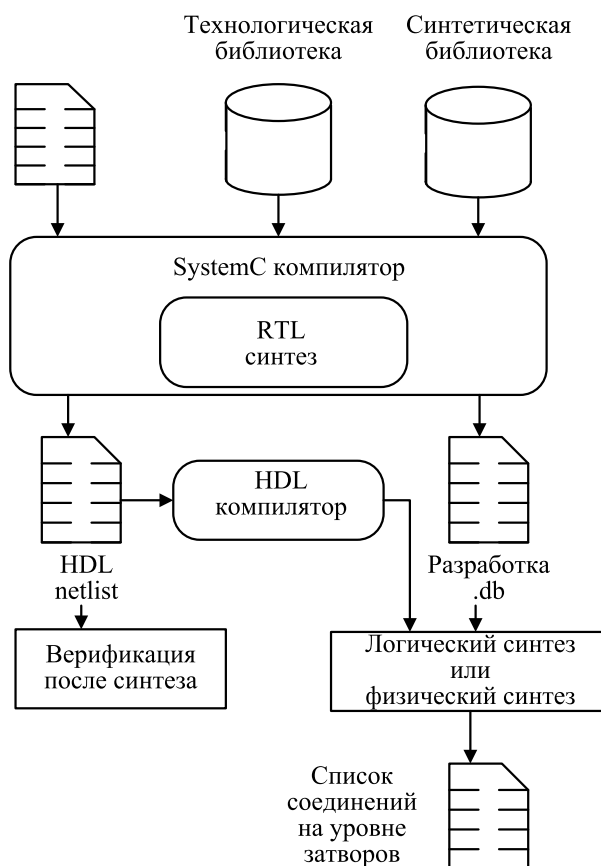


Рис. 8. Процесс RTL-синтеза в SystemC.

Дизайнер предоставляет путь к выбранным синтетическим библиотекам для своего дизайна, определяя переменную синтетическую библиотеку в `dc_shell`.

SystemC Compiler создает расширенный .db-файл для ввода в инструмент проектирования компилятора. Он также генерирует RTL файлы HDL (например, Verilog), которые могут использоваться в потоках на основе HDL.

Последние версии языка SystemC предназначены для моделирования и проектирования цифровых и микропроцессорных устройств. В первых публикациях [12–15] приведены примеры моделирования логических цифровых устройств, триггеров, счетчиков, регистров, конечных автоматов. В [16] описаны модели счетчиков в коде Грея, декодеров Джонсона.

SystemC-AMS для аналоговых и смешанных сигналов

Многие технические системы состоят из цифровых и аналоговых подсистем, в которых цифровые подсистемы контролируются программным обеспечением. Моделирование смешанного сигнала, т.е. комбинированное цифровое и аналоговое моделирование имеет очень важное значение при разработке таких гетерогенных систем. К сожалению, имитаторы смешанных сигналов на несколько порядков медленнее, чем эффективное системное моделирование. Кроме того, совместное моделирование оборудования со смешанным сигналом со сложным программным обеспечением, обычно написанным на C или C++, поддерживается недостаточно.

Перспективным подходом к преодолению этих трудностей является применение SystemC и его расширения для аналоговых и смешанных сигналов SystemC–AMS, созданные для обеспечения единой и стандартизированной методологии для моделирования систем E AMS [17, 18].

Варианты использования SystemC–AMS и требования

Как показано на рис. 9, расширения SystemC–AMS могут использоваться для самых разных вариантов, таких как исполняемая спецификация, виртуальное прототипирование, изучение архитектуры, проверка интеграции.

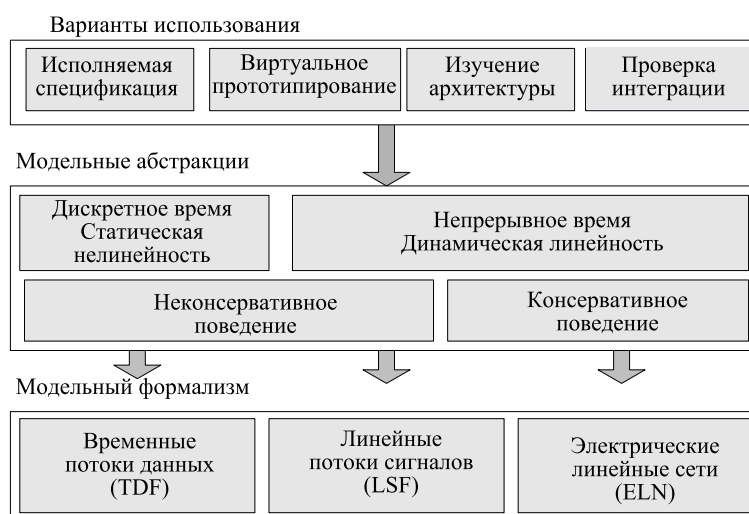


Рис. 9. Варианты использования SystemC–AMS, модельные абстракции и модельный формализм.

Исполняемая спецификация выполняется для проверки правильности требований к системе посредством создания исполняемого описания системы с помощью моделирования. Для этого варианта используются модели на высоком уровне абстракции, которые необязательно должны быть связаны с физической архитектурой или внедрением системы. Поэтому они называются функциональными или алгоритмическими.

Виртуальное прототипирование направлено на предоставление разработчикам программного обеспечения высокоуровневых или временных моделей, которые представляют собой аппаратную архитектуру и обеспечивают высокую скорость моделирования. Специально для E-AMS систем, в которых программное обеспечение или встроенное ПО взаимодействуют напрямую с оборудованием AMS, обеспечена совместимость с использованием расширения SystemC Transaction-Level Modeling (TLM). Подсистема AMS может моделировать часть виртуального прототипа для дальнейшей разработки подсистемы HW/SW.

После определения архитектуры и проектирования аналоговых и цифровых компонентов HW/SW эти компоненты будут интегрированы, и их правильность проверяется в рамках всей системы. Интерфейсы и типы данных, используемые в модели, должны соответствовать физической реализации. Для аналоговых схем это относится к электрическим узлам. Для цифровых схем это относится к точности контактов на шинах. Для систем HW/SW могут подходить интерфейсы TLM.

Модели вычислений в SystemC-AMS

SystemC-AMS определяют основные формализмы моделирования, необходимые для поддержки AMS поведенческого моделирования на разных уровнях абстракции. Эти формализмы моделирования реализуются с использованием различных моделей вычислений: временной поток данных (TDF), линейный поток сигналов (LSF) и электрические линейные сети (ELN).

А. *Временной поток данных (TDF)*. Семантика выполнения на основе TDF представляет собой моделирование непрерывного и дискретного времени без дополнительных расходов на динамическое планирование, наложенное ядром дискретного события SystemC. Моделирование ускоряется путем определения статического графика, который вычисляется до начала моделирования и который выполняется функцией обработки запланированных модулей TDF в соответствии с направлением потока данных. Образцы дискретного времени, которые распространяются через модули TDF, могут представлять любой C++ тип. Если используется, например, вещественный тип, такой как double, сигнал TDF может представлять собой напряжение или ток на данный момент времени.

Б. *Линейный поток сигналов (LSF)*. Формализм линейного сигнала поддерживает моделирование непрерывного поведения, предлагая согласованный набор примитивных модулей, таких как сложение, умножение, интеграция или задержка. Модель LSF состоит из соединения таких примитивов посредством сигналов вещественной временной области, представляющих любые виды непрерывного количества. Модель LSF определяет систему линейных уравнений, которая решается линейным вычислителем DAE.

В. *Электрические линейные сети (ELN)*. Моделирование электрических сетей поддерживается путем создания заданных линейных сетевых примитивов, таких как резисторы или конденсаторы, которые используются в качестве макромоделей для описания непрерывных отношений между напряжениями и токами. Доступен ограниченный набор линейных примитивов и переключателей для моделирования энергосберегающего поведения.

Архитектура стандарта языка AMS

На рис. 10 показана архитектура стандарта языка AMS [17, 18].

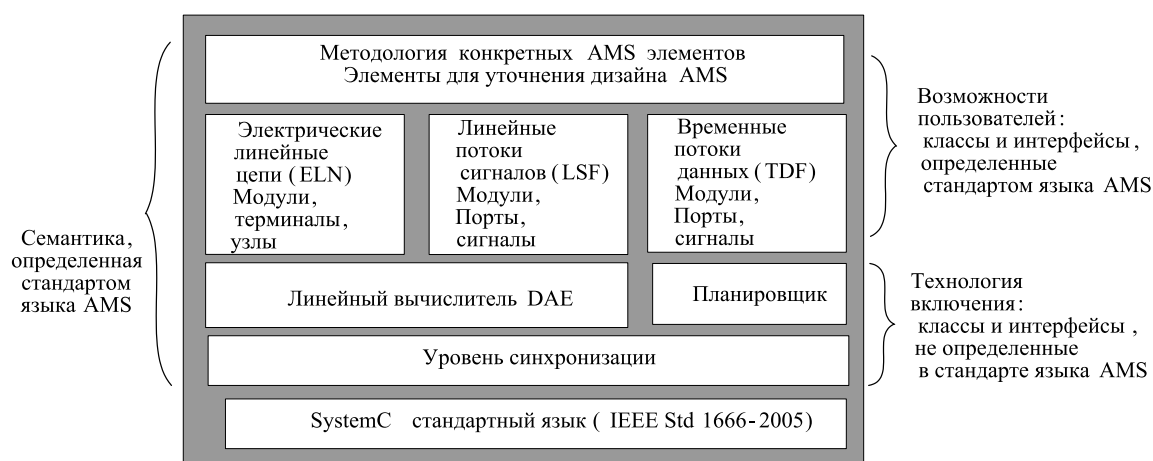


Рис. 10. Архитектура стандарта языка AMS.

Расширения SystemC–AMS полностью совместимы со стандартом языка SystemC. Стандарт языка AMS определяет семантику выполнения вычислений для моделей TDF, LSF и ELN и дает представление о основополагающих технологиях, таких как линейный вычислитель, планировщик и уровень синхронизации. В настоящее время включение интерфейсов и определение классов для этих основополагающих технологий определяется реализацией. Разработчик AMS (конечный пользователь) может использовать классы и интерфейсы для создания моделей TDF, LSF или ELN с использованием предопределенных модулей, портов, терминалов, сигналов и узлов.

Примеры применения SystemC–AMS

В [19, 20] приведены примеры использования SystemC–AMS для моделирования активных фильтров на операционных усилителях, аналого-цифрового преобразователя с интегрированием входного сигнала, квадратурного фазового модулятора с цифро-аналоговым преобразователем, дельта-игма модулятора, фильтра Баттерворта 5-го порядка, который моделируется как линейная электрическая цепь, сигма-дельта модулятора с полосовым фильтром, позиционно-чувствительного детектора, считывателя CD-ROM и т.п.

В [21] отмечается, что задачей разработки систем E-AMS является понимание взаимодействия между HW/SW и подсистемами аналогового и смешанного сигналов на уровне архитектуры. Это требует некоторых средств моделирования взаимодействующих аналоговых/смешанных сигналов и систем HW/SW на функциональном и архитектурном уровнях. В [21] приведена спецификация простого бинарного приемника с двоичной амплитудной манипуляцией (BASK), состоящего из микшера, фильтра нижних частот и демодулятора BASK, и рассмотрена последовательность проектирования устройства.

Для подготовки дизайна и проверки интеграции всех подсистем должны быть точно смоделированы интерфейсы и типы данных, используемые в моделях. Для аналоговых схем это относится к электрическим узлам. Для цифровых схем – к точному выводу на шины. Для систем HW/SW интерфейсы TLM могут быть наиболее подходящими. После определения и проектирования аналоговых, цифровых компонентов HW и SW эти компоненты будут интегрированы, и их правильность проверяется в общей системе.

Виртуальное прототипирование предоставляет разработчикам программного обеспечения высокоуровневую или временную модель, которая представляет собой аппаратную архитектуру. Для систем E-AMS, где программное обеспечение взаимодействует с оборудованием AMS, особенно важно взаимодействие с расширениями SystemC TLM.

Заключение

Язык разработки SystemC в настоящее время широко применяется для разных уровней проектирования и верификации цифровых систем на кристалле.

SystemC–AMS расширяют доступный стандарт SystemC для поддержки линейных электрических сетей, линейного потока сигналов и временных моделей потока данных, чтобы эффективно моделировать аналоговые архитектуры смешанного сигнала. Новые языковые конструкции поддерживают создание аналоговых и смешанных сигналов на более высоких уровнях абстракции, вводя функциональное и архитектурное моделирование. Это позволяет использовать методологию уточнения дизайна для исполняемой

спецификации, исследования архитектуры, проверки интеграции и виртуального прототипирования систем E-AMS. Расширение SystemC-AMS поддерживает особые требования, например, для моделирования нелинейных или радиочастотных систем.

Расширение уникальных возможностей SystemC с новыми функциями AMS предлагает мощную систему моделирования и симуляции, позволяющую разрабатывать и проверять широкий спектр приложений и систем.

Литература:

1. Алехин В.А. SystemC. Моделирование электронных систем. Учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2018. 320 с.
2. Алехин В.А., Быков И.А. Применение SystemC для проектирования электронных систем. Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Наука, образование, общество». Тамбов, 31 марта 2018. С. 7-11.
3. Devalapalli S. Development of SystemC Modules from HDL for System-on-Chip Applications. Master's Thesis, University of Tennessee, 2004.
URL: http://trace.tennessee.edu/utk_gradthes/2119
4. Functional specification for SystemC 2.0. April 5, 2002.
[Электронный ресурс]. <http://www.systemc.org>
5. Technical Tutorial: "SystemC Design and Verification – Solidifying the Abstraction Above RTL". Feb. 2, 2017.
[Электронный ресурс]. <http://videos.accelera.org/systemc2017/>
6. Ma A., Zacharda A. SystemC. Utilizing SystemC for Design and Verification. USA: Mentor Graphics, 2005. p. 33.
7. Requirements specification for SystemC Analog Mixed Signal (AMS) extensions. Version 2.1. March 8, 2010.
[Электронный ресурс]. <http://www.systemc.org>
8. Banerjee A., Sur B. SystemC and SystemC – AMS in Practice. SystemC 2.3, 2.2 and SystemC – AMS 1.0. New York, Dordrecht, London: Springer Cham Heidelberg; 2014. 462 p.
9. OSCI TLM-2.0 Language reference manual. Software version: TLM 2.0.1 Document version: JA32.: Open SystemC Initiative (OSCI). 2009. 194. p.
10. Aynsley J. Getting Started with TLM-2.0: Doulos.Ltd., 2017. [Электронный ресурс].
https://www.doulos.com/knowhow/systemc/tlm2/tutorial__1/
11. Grotker Th., Liao S., Martin G., Swan S. System Design with SystemC. New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers; 2002. 236 p.
12. Kalo G. Functional Verification with SystemC. Magnus Ljung, Integrated Systems Scandinavia AB. Christer Albinsson, KTH Syd. 2006. 29 p.
13. Yuan Wen and Hani Mohamed Khalil. SystemC-based electronic system level design methodology for SoC design-space exploration. In: Advances In Microelectronics. Penerbit UTM, Skudai, Johor Bahru, 2008. P. 9-34.
14. Black D. C., Donovan J., Bunton B., Keist A. SystemC: From the Ground Up. Second Edition. New York, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer; 2010. 291 p.
15. Describing Synthesizable RTL in SystemC. Printed in the U.S.A.: Synopsys, Inc., 2001. 116 p.
16. Bhasker J. A SystemC Primer. USA: Star Galaxy Publishing; 2002. 283 p.
17. Standard SystemC – AMS extensions Language Reference Manual. Open SystemC Initiative (OSCI). 2010. 152 p.
[Электронный ресурс]. <http://www.systemc.org>
18. Requirements specification for SystemC Analog Mixed Signal (AMS) extensions Version 2.1. Open SystemC Initiative (OSCI). March 8, 2010. 27 p.
[Электронный ресурс]. <http://www.systemc.org>
19. SystemC – AMS extensions User's Guide. Open SystemC Initiative (OSCI). 2010. 166 p.
[Электронный ресурс]. <http://www.systemc.org>
20. Banerjee A., Sur B. SystemC and SystemC – AMS in Practice. SystemC 2.3, 2.2 and SystemC – AMS 1.0. New York, Dordrecht, London: Springer Cham Heidelberg; 2014. 462 p.
21. Grimm Ch., Barnasconi M., Vachoux A., Einwich K. An Introduction to Modeling Embedded Analog/Mixed-Signal Systems using SystemC – AMS Extensions. Open SystemC Initiative (OSCI). 2008. 12 p.
[Электронный ресурс]. https://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_171466.pdf

References:

1. Alekhin V.A. *Modelirovaniye jelektronnykh sistem: uchebn. posobie dlya VUZov* (SystemC. Modeling of electronic systems). Moscow: Hotline – Telecom; 2018. 320 p. (in Russ.).

2. Alekhin V.A., Bykov I.A. Application SystemC for the design of electronic systems. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Science, Education, Society". Tambov, March 31, 2018. P. 7-11 (in Russ.).
3. Devalapalli S. Development of SystemC Modules from HDL for System-on-Chip Applications. Master's Thesis, University of Tennessee, 2004.
URL: http://trace.tennessee.edu/utk_gradthes/2119
4. Functional specification for SystemC 2.0. April 5, 2002.
[Electronic resource]. <http://www.systemc.org>
5. Technical Tutorial: "SystemC Design and Verification – Solidifying the Abstraction Above RTL". Feb. 2, 2017.
[Electronic resource]. <http://videos.accellera.org/systemc2017/>
6. Ma A., Zacharda A. SystemC. Utilizing SystemC for Design and Verification. USA: Mentor Graphics. 2005. 33 p.
7. Requirements specification for SystemC Analog Mixed Signal (AMS) extensions. Version 2.1. March 8, 2010.
[Electronic resource]. <http://www.systemc.org>
8. Banerjee A., Sur B. SystemC and SystemC – AMS in Practice. SystemC 2.3, 2.2 and SystemC – AMS 1.0. New York, Dordrecht, London: Springer Cham Heidelberg; 2014. 462 p.
9. OSCI TLM-2.0 Language reference manual. Software version: TLM 2.0.1 Document version: JA32.: Open SystemC Initiative (OSCI). 2009. 194 p.
10. Aynsley J. Getting Started with TLM-2.0: Doulos.Ltd., 2017. [Electronic resource].
URL: https://www.doulos.com/knowhow/systemc/tlm2/tutorial__1/
11. Grotker Th., Liao S., Martin G., Swan S. System Design with SystemC. New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers; 2002. 236 p.
12. Kalo G. Functional Verification with SystemC. Magnus Ljung, Integrated Systems Scandinavia AB. Christer Albinsson, KTH Syd. 2006. 29 p.
13. Yuan Wen and Hani Mohamed Khalil. SystemC-based electronic system level design methodology for SoC design-space exploration. In: Advances In Microelectronics. Penerbit UTM, Skudai, Johor Bahru, 2008. P. 9-34.
14. Black D. C., Donovan J., Bunton B., Keist A. SystemC: From the Ground Up. Second Edition. New York, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer; 2010. 291 p.
15. Describing Synthesizable RTL in SystemC. Printed in the U.S.A.: Synopsys, Inc., 2001. 116 p.
16. Bhasker J. A SystemC Primer. USA: Star Galaxy Publishing; 2002. 283 p.
17. Standard SystemC – AMS extensions Language Reference Manual. Open SystemC Initiative (OSCI). 2010. 152 p.
[Electronic resource]. <http://www.systemc.org>
18. Requirements specification for SystemC Analog Mixed Signal (AMS) extensions Version 2.1. Open SystemC Initiative (OSCI). March 8, 2010. 27 p.
[Electronic resource]. <http://www.systemc.org>
19. SystemC – AMS extensions User's Guide. Open SystemC Initiative (OSCI). 2010. 166 p.
[Electronic resource]. <http://www.systemc.org>
20. Banerjee A., Sur B. SystemC and SystemC – AMS in Practice. SystemC 2.3, 2.2 and SystemC – AMS 1.0. New York, Dordrecht, London: Springer Cham Heidelberg; 2014. 462 p.
21. Grimm Ch., Barnasconi M., Vachoux A., Einwich K. An Introduction to Modeling Embedded Analog/Mixed-Signal Systems using SystemC – AMS Extensions. Open SystemC Initiative (OSCI). 2008. 12 p.
[Electronic resource]. https://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_171466.pdf

Об авторе:

Алехин Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры вычислительной техники Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). ResearcherID: B-4747-2016, <http://orcid.org/0000-0001-8291-6052>

About the author:

Vladimir A. Alekhin, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Department of Computing Engineering, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). ResearcherID B-4747-2016, <http://orcid.org/0000-0001-8291-6052>

Поступила: 18.12.2019; Получена после доработки: 23.01.2020; Принята к опубликованию: 22.06.2020.

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-4-96-111>



УДК 519.857

Динамическое программирование в прикладных задачах, допускающих сокращение перебора вариантов

**Д.А. Карпов,
В.И. Струченков[@]**

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: str1942@mail.ru

В статье рассматривается разработанный Р. Беллманом алгоритм динамического программирования, основанный на поиске оптимальной траектории, соединяющей узлы предварительно заданной регулярной сетки состояний. Анализируются возможности резкого повышения эффективности применения динамического программирования при решении прикладных задач, обладающих специфическими особенностями, что позволяет отказаться от разбиения регулярной сетки состояний и реализовать алгоритм поиска оптимальной траектории при отбраковке не только бесперспективных вариантов путей, приводящих в каждое из состояний, и всех их продолжений, как в алгоритме Р. Беллмана, но и собственно бесперспективных состояний и всех вариантов исходящих из них путей. Сформулированы и обоснованы условия, при которых возможна отбраковка бесперспективных состояний. Установлено, что многие прикладные задачи удовлетворяют этим условиям. Для решения подобных задач предложен и реализован новый алгоритм динамического программирования. Приводятся конкретные примеры таких прикладных задач: оптимальное распределение однородного ресурса между несколькими потребителями, оптимальная загрузка транспортных средств, оптимальное распределение финансов при выборе инвестиционных проектов. Для решения этих задач ранее предлагались алгоритмы динамического программирования с отбраковкой бесперспективных путей, но без отбраковки состояний. Число бесперспективных состояний, появляющихся на различных этапах динамического программирования, и, соответственно, эффективность нового алгоритма, зависит от конкретных числовых значений исходных данных. Для двухпараметрической задачи оптимальной загрузки транспортных средств при ограничении по весу и объёму приведены результаты сопоставительных расчётов по алгоритму Р. Беллмана и

по новому алгоритму динамического программирования. В качестве исходных данных для серии расчётов использовались псевдослучайные числа. В результате анализа показано, что сравнительная эффективность алгоритма с отбраковкой состояний растёт при увеличении размерности задачи. Так в задаче оптимального выбора предметов для загрузки транспортного средства заданной грузоподъёмности при числе предметов 150 количество запоминаемых состояний и время счёта снижаются в 50 и 57 раз, соответственно, при использовании нового алгоритма по сравнению с классическим алгоритмом Р. Беллмана. Для 15 предметов соответствующие числа равны 13 и 4.

Ключевые слова: динамическое программирование, целевая функция, оптимальная траектория, уравнение Р. Беллмана.

Для цитирования: Карпов Д.А., Струченков В.И. Динамическое программирование в прикладных задачах, допускающих сокращение перебора вариантов. *Российский технологический журнал*. 2020;8(4):96-111. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-4-96-111>

Dynamic programming in applied tasks which are allowing to reduce the options selection

Dmitry A. Karpov,
Valeriy I. Struchencov@

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

@Corresponding author, e-mail: str1942@mail.ru

The article discusses the dynamic programming algorithm developed by R. Bellman, based on the search for the optimal trajectory connecting the nodes of a predefined regular grid of states. Possibilities are analyzed for a sharp increase in the effectiveness of using dynamic programming in solving applied problems with specific features, which allows us to refuse to split a regular grid of states and implement an algorithm for finding the optimal trajectory when rejecting not only unpromising options for paths leading to each of the states, and all of them continuations, as in R. Bellman's algorithm, but also actually hopeless states and all variants of paths emanating from them. The conditions are formulated and justified under which the rejection of hopeless states is possible. It has been established that many applied problems satisfy these conditions. To solve such problems, a new dynamic programming algorithm described in the article is proposed and implemented. Concrete examples of such applied problems are given: the optimal distribution of a homogeneous resource between several consumers, the optimal loading of vehicles, the optimal distribution of finances when choosing investment projects. To solve these problems, dynamic programming algorithms with rejecting unpromising paths, but without rejecting states, were previously proposed. The number of hopeless states that appear at various stages of dynamic programming and, accordingly, the effectiveness of the new algorithm depends on the specific numerical values of the source data. For the two-parameter problem of optimal loading of vehicles with weight and volume constraints, the results of comparative calculations by the R. Bellman algorithm and the new dynamic programming algorithm are presented. As a source of data for a series of calculations, pseudorandom numbers were used. As a result of the analysis, it was shown that the comparative efficiency of the algorithm with rejection of states increases with increasing dimension of the problem. So, in the problem of the optimal choice of items for loading a vehicle of a given carrying capacity with a number of items of 150, the number of memorized states and the counting time are reduced by 50 and 57 times, respectively, when using the new algorithm compared to the classical algorithm of R. Bellman. And for 15 items, the corresponding numbers are 13 and 4.

Keywords: dynamic programming, objective function, optimal trajectory, rejection of states.

For citation: Karpov D.A., Struchenkov V.I. Dynamic programming in applied tasks which are allowing to reduce the options selection. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = *Russian Technological Journal*. 2020;8(4):96-111 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-4-96-111>

Введение

Метод динамического программирования для решения задач оптимизации был предложен американским математиком Р. Беллманом в середине прошлого века. Основная идея метода состоит в сведении исходной сложной задачи к последовательности относительно простых однотипных задач. Рассматривалась задача управления движением динамической системы, состояние которой описывается одним или несколькими параметрами. Внешние воздействия (управления), производимые в заданные дискретные моменты времени, переводят систему из одного состояния в другое. Последовательность переходов образует траекторию движения системы. Каждый переход сопровождается соответствующими затратами. Ставилась задача: найти такой набор управлений, который переводит систему из заданного начального состояния в заданное конечное состояние с наименьшими затратами.

Метод основан на принципе оптимальности Р. Беллмана, смысл которого состоит в следующем: если в каждом из состояний, в котором может находиться система, её дальнейшее поведение не зависит от того, как она оказалась в этом состоянии, то дальнейшая траектория должна быть оптимальной. Другими словами, речь идёт о системах без влияния предыстории. Важно отметить, что, будет влиять предыстория или нет, зависит от формализации понятия «состояние системы» при решении конкретной прикладной задачи. Кроме того, должна быть возможность вычисления целевой функции для каждого этапа (управления) отдельно.

Реально встречаются задачи, в которых целевую функцию можно вычислить только для полного набора переменных, т.е. только после того, как имеется вариант всей траектории (вариант пути из начальной точки в конечную).

На русском языке книга Р. Беллмана была издана в 1960 г. [1] и вызвала большой интерес широкого круга советских исследователей, преподавателей, специалистов различных областей деятельности. Сложилось впечатление, что новый метод позволит решить многие прикладные задачи, которые в то время казались неразрешимыми.

Однако первоначальная эйфория вскоре рассеялась, так как этот метод далеко не универсальный и объём вычислений, необходимых для решения реальных прикладных задач, оказался столь значительным, что реализация метода на имевшихся в то время общедоступных ЭВМ, таких как БЭСМ 2, Минск 22, Урал и др. была невозможна.

Попытки упростить задачу при дополнительных допущениях с тем, чтобы получить хоть какое-то машинное решение далеко не всегда были успешными. Так, одной из первых попыток использования метода динамического программирования в проектировании продольного профиля новых железных дорог были разработки Института Кибернетики АН УССР и ЦНИИС Минтранстроя [2, 3], в которых использовался предложенный В.С. Михалевичем метод последовательного анализа вариантов [4]. По существу этот метод отличался от оригинального метода Р. Беллмана только тем, что оптимальная траектория строилась по направлению не от конечной точки к начальной, а от начальной точки к конечной.

Эта попытка оказалась неудачной из-за принятых допущений при реализации алгоритма. Ключевое понятие – состояние системы – было формализовано как узел сетки

варьирования [3]. При этом нарушался принцип оптимальности, так как множества возможных продолжений двух сравниваемых путей, приводящих в заданное состояние, не совпадали из-за влияния ограничений по разности уклонов [3]. В условиях пересечённого рельефа это приводило не только к отклонениям от оптимума, но и к остановке алгоритма из-за отсутствия допустимых продолжений (вырождение вариантов).

Корректный алгоритм был реализован только к 1975 г. [5], когда стали считать состоянием системы отрезок, соединяющий два узла, и сравнивать только такие варианты, у которых этот отрезок общий. Однако и в этом случае алгоритм можно было использовать только для простых моделей целевой функции, например, объёмов земляных работ, тогда как при оптимизации по строительной стоимости для вычисления целевой функции нужно иметь траекторию полностью. На участках, где насыпи сооружаются из грунта выемок, появляется дополнительная взаимосвязь элементов искомой проектной линии. Задача была решена по методу проекции градиента [6] с учётом этой взаимосвязи и особенностей структуры матрицы системы ограничений. Соответствующий пакет программ «Профиль» для ЭВМ БЭСМ 4 широко использовался при проектировании Байкало-Амурской магистрали.

В процессе решения задачи об оптимальном профиле дороги были выявлены недостатки метода динамического программирования, что позволило в дальнейшем избежать ошибок при его применении.

В начале 60-х годов прошлого века Р. Беллман с сотрудниками, располагая более мощными ЭВМ, чем доступные в то время для советских исследователей, реализовали свой метод при решении ряда практически важных задач [7].

В настоящее время алгоритмы динамического программирования успешно применяются для решения прикладных задач из различных областей практики [8–22]. Одно из последних предложений – это аппроксимация плоских кривых, заданных дискретно, сплайнами сложной структуры [23].

Алгоритм Р. Беллмана получил широкое практическое применение, излагается в учебной литературе и может считаться классическим.

Однако при использовании этого алгоритма объём вычислений резко возрастает с ростом размерности задачи и остаётся значительным даже для современных общедоступных компьютеров. Это особенно важно при разработке систем, в которых динамическое программирование встроено в многократно повторяющийся цикл расчётов. В этой связи поиск возможностей сокращения перебора вариантов в динамическом программировании при разработке новых алгоритмов с использованием особенностей конкретных прикладных задач продолжает оставаться актуальным.

Цель настоящей статьи – изложить новый алгоритм динамического программирования, который позволяет решить многие прикладные задачи с резким сокращением перебора вариантов за счёт отбраковки не только бесперспективных путей, приводящих в конкретное состояние, но и собственно бесперспективных состояний.

1. Динамическое программирование с разбиением регулярной сетки состояний

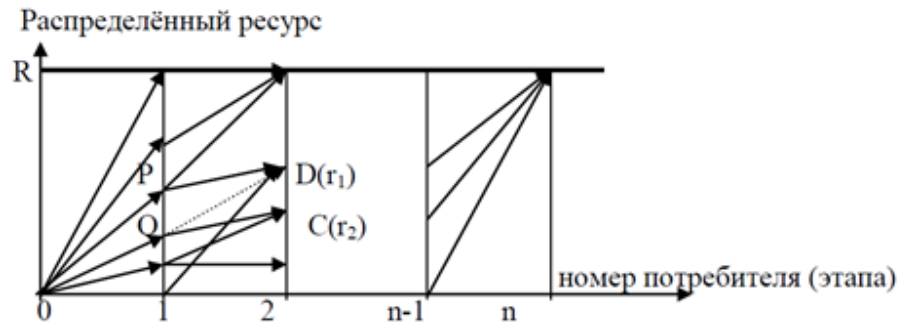
Одна из первых прикладных задач, решённых Р. Беллманом по его методу, – это задача оптимального распределения ограниченного объёма однородного ресурса между несколькими потребителями.

Задача состоит в следующем [1]:

Найти $\max \sum_{i=1}^n f_i(x_i)$ при $\sum_{i=1}^n x_i \leq R$,

где R – это распределяемое количество ресурса, $x_i \geq 0$ – его количество, выделенное для i -го потребителя, а $f_i(x_i)$ – эффективность использования ресурса i -ым потребителем.

В рассматриваемой задаче очередной этап (шаг) – это определение количества ресурса для очередного потребителя, а **состояние системы – это уже распределённый ресурс**, который не должен превышать заданной величины R (рисунок).



Многоэтапный процесс распределения ресурса.

Первый потребитель может получить $x_1 = 0, \delta, 2\delta, 3\delta, \dots, k\delta \leq R$ единиц ресурса с оценкой эффективности $f_1(x_1)$. Второй потребитель может получить не более, чем $x_2 = R - x_1$ (это остаток ресурса). Сумма $r = x_1 + x_2$ – это состояние системы после второго этапа. В него можно перейти разными путями с различной эффективностью. Её максимальное значение по наилучшему пути обозначим $\Phi_2(r) = f_1(x_1) + f_2(x_2)$. Далее $\Phi_i(r)$ – это максимальная эффективность за i этапов при распределённом ресурсе r . Предполагается, что все функции $f_i(x_i)$ неубывающие. В соответствии с принципом оптимальности должно выполняться уравнение Р. Беллмана, которое даёт рекуррентную связь между $\Phi_i(r)$ и $\Phi_{i-1}(r)$

$$\Phi_i(r) = \max_{x_i} (f_i(x_i) + \Phi_{i-1}(r - x_i)).$$

Это означает, что в любое состояние r на i -ом этапе надо переходить из такого состояния на $(i-1)$ -ом этапе, при котором суммарная эффективность перехода в состояние r из начальной точки была бы максимальной. Такой выбор x_i (рисунок) означает выбор наиболее эффективного из всех путей, сходящихся в одной точке i -ой вертикали, которой соответствует ресурс r . Значение эффективности по этому пути $\Phi_i(r)$ и состояние $r - x_i$ запоминаются для всех r . Сравнение путей, приводящих в одно и то же состояние, с отбраковкой бесперспективных путей **и всех их продолжений** делают динамическое программирование более эффективным, чем полный перебор вариантов. Но при решении задач большой размерности (мелкой сетке) по этому алгоритму затраты машинного времени могут оказаться неприемлемо велики.

Возникает вопрос об **отбраковке не только путей**, приводящих в одно и то же состояние, **но и собственно бесперспективных состояний (хотя бы в некоторых задачах)**.

Применительно к рассматриваемой задаче этот вопрос означает: могут ли на одном и том же этапе быть два состояния с $r_1 > r_2$ и $\Phi_i(r_1) < \Phi_i(r_2)$? Пусть в состоянии r_1 (точка D

на рисунке) по оптимальному пути переходим из точки P предыдущего этапа, а в состояние r_2 (точка C) из точки Q . Но переходя из точки Q в точку D , получим большую (или равную) эффективность, чем $\Phi_i(r_2)$ так как все функции $f_i(x_i)$ неубывающие.

В данной задаче ответ на поставленный вопрос об отбраковке состояний отрицательный, и с увеличением затрат ресурса увеличивается и эффективность. Однако существуют задачи, в которых в отличие от рассматриваемой далеко не все переходы возможны.

2. Отбраковка бесперспективных состояний

Рассмотрим классическую задачу целочисленного (бинарного) линейного программирования, известную как задача о рюкзаке:

Найти $\max z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$ при

$$a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n \leq b, x_i \in \{0,1\}, a_j > 0; c_j > 0; j = 1, \dots, n. \quad (1)$$

Можно считать, что задача состоит в оптимальном распределении заданного ресурса b между n потребителями, j -ый потребитель получает a_j единиц ресурса или ничего. Но можно говорить о задаче оптимального выбора из n предметов. При выборе j -го предмета затрачивается ресурс в количестве a_j и достигается эффект c_j . Выбирать нужно так, чтобы не израсходовать ресурса больше b и достигнуть максимального суммарного эффекта z .

Если может быть несколько $k_j > 1$ экземпляров некоторых или всех предметов, то есть $x_j \in \{0,1, \dots, k_j\}$, то принципиальных сложностей по сравнению с задачей (1) не возникает. От рассмотренной выше задачи распределения ресурса данная задача отличается тем, что ресурс распределяется неравными долями, то есть при формализации понятия «состояние системы» как количество уже распределённого ресурса мы не получаем регулярной сетки состояний. Именно это обстоятельство может дать и, как будет показано ниже на конкретных задачах, дает возможность отбраковки бесперспективных состояний. Состояние A бесперспективно и может далее не рассматриваться, если на том же этапе есть другое состояние B , которому соответствует меньший затраченный ресурс, но не меньшая эффективность. При этом должно выполняться дополнительное условие: из состояния B в конечное состояние можно перейти с не меньшей эффективностью, чем по наилучшему пути из состояния A .

В рассматриваемых задачах это условие выполнено, так как возможности выбора и соответствующие последствия (затраты ресурса и эффективность) на оставшихся этапах одинаковы для всех состояний одного и того же этапа.

Можно рассматривать задачу (1) при любом количестве экземпляров каждого предмета, как двухкритериальную: один критерий – эффективность (требуется максимум), а другой критерий – суммарный использованный ресурс (требуется минимум), тогда на каждом этапе оставшиеся состояния должны образовывать множество Парето. При этом остаётся и отбраковка путей, приводящих в одно и то же состояние. Поэтому в каждое состояние из паретовского множества после отбраковки приводит только один путь. Как уже отмечалось, для отбраковки путей в классическом алгоритме Р. Беллмана требовалось отсутствие влияния предыстории. Для отбраковки состояний на каждом шаге для любых двух состояний равные приращения ресурса (воздействия на систему)

должны приводить к равным изменениям эффективности (целевой функции). В этом случае возможность отбраковки неэффективных (по Парето) состояний очевидна.

Задание всего множества допустимых состояний в виде регулярной сетки не требуется. Множество Парето [24] на каждом этапе формируется в процессе счёта.

Остаётся показать, что для многих прикладных задач условия отбраковки состояний выполняются, и при этом повышается эффективность в смысле меньшего объёма вычислений и требуемой памяти по сравнению с классическим динамическим программированием.

Для начала рассмотрим простую задачу, в которой выявлена высокая эффективность алгоритма, использующего отбраковку состояний.

3. Оптимальное использование транспортных средств

Будем рассматривать задачу.

Найти $\max z = c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_n x_n$ при

$$a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n \leq b, a_j > 0; c_j > 0; j = 1, \dots, n.$$

Это задача (1) при

$$x_j \in \{0, 1, \dots, k_j\}, j = 1, \dots, n. \quad (2)$$

Целочисленность a_j и c_j ($j = 1, \dots, n$) не требуется. Здесь a_j – вес предмета j -го вида, а c_j – его стоимость. Если все $k_j = 1$ то это задача о рюкзаке. Переменными являются x_j – число предметов j -го вида, которые надо взять, чтобы не превысить максимальную грузоподъёмность b и получить максимальную суммарную стоимость.

Задача оптимальной загрузки транспортного средства была решена Р. Беллманом [1] с отбраковкой вариантов путей (траекторий), приводящих в одно и то же состояние, но без отбраковки бесперспективных состояний. Этот же алгоритм приводится при рассмотрении других примеров и задач в учебной литературе [25, 26].

Отметим, что нет необходимости в разбиении сетки состояний, а при отсутствии целочисленности a_j из двух близких состояний, получаемых в процессе счёта, можно оставить одно. Мера близости – это аналог дискрета, используемого при разбиении регулярной сетки, к узлам которой притягиваются состояния с нецелыми значениями параметров, которыми они определяются (в данной задаче это суммарный вес выбранных предметов). Эта мера зависит от требуемой точности решения задачи и от точности исходных данных.

Оптимальную траекторию (путь) удобно строить «от начала к концу», в качестве состояния системы принимать суммарный вес выбранных предметов и вычислять соответствующую суммарную стоимость.

Независимо от количества экземпляров каждого предмета алгоритм решения задачи состоит из следующих пунктов:

1. Упорядочиваем предметы по возрастанию веса.
2. Если в соответствующей последовательности стоимостей нарушается монотонность, то исключаем предмет, имеющий больший вес, но меньшую стоимость, чем предшествующий.

3. На первом шаге рассматриваем все состояния, получаемые при выборе допустимого числа экземпляров первого предмета. Для каждого состояния вычисляем суммарное значение стоимости. Никакой отбраковки нет.

4. На последующих шагах (с номерами $t = 2, 3, \dots, n$) решается вопрос о добавлении к уже выбранным одного или нескольких экземпляров предмета с номером t при соблюдении ограничения по грузоподъёмности. Если этот предмет не брать, то на шаге t фиксируются все состояния шага $t - 1$. Если брать, то для каждого состояния шага $t - 1$ последовательно рассматривается целесообразность дополнения к нему $1, 2, 3, \dots, k_t$ числа экземпляров без превышения ресурса грузоподъёмности. При этом к каждому состоянию $(t - 1)$ -го шага добавляется соответствующий вес, и определяется положение нового состояния в массиве (списке) имеющихся состояний с сохранением упорядоченности по возрастанию. Возможны различные ситуации при вычислении нового состояния на шаге t :

4.1. Новое состояние совпадает с одним из имеющихся. В этом случае остаётся то из них, которому соответствует бóльшая стоимость (как в классическом алгоритме).

4.2. Новое состояние сравнивается с предшествующим ему. Если новому состоянию соответствует бóльшая стоимость, то оно помещается в массив состояний шага t , иначе исключается из рассмотрения.

4.3. Новое состояние сравнивается со следующим за ним (если оно есть). Если новому состоянию соответствует бóльшая (или равная) стоимость, то оно ставится в массив вместо имеющегося. При этом возможна отбраковка нескольких состояний с бóльшим использованным ресурсом, но с меньшей (или равной стоимостью) по сравнению с новым состоянием.

5. Для каждого состояния запоминаются суммарные вес и стоимость, а также связь с предшествующим этапом, то есть состояние, из которого пришли в данное состояние.

6. После последнего этапа допустимое состояние с большей стоимостью даёт ответ к задаче (максимальное значение целевой функции) и обратным разворотом по цепочке связей восстанавливается оптимальная траектория. В данной задаче это количество экземпляров каждого из предметов, которые надо выбрать.

Для иллюстрации применимости и эффективности динамического программирования с отбраковкой состояний рассмотрим несколько задач.

Задачу об оптимальной загрузке транспортного средства будем рассматривать в её самой простой постановке [1], т.е. как задачу о рюкзаке (1). Решение этой задачи приводится в учебной литературе как пример применения метода динамического программирования [12].

Численный пример заимствован из книги Е.С. Вентцель [25], где он описывается следующим образом. Имеется автомашина грузоподъёмностью $Q = 35$ единиц веса и шесть предметов, каждый в одном экземпляре, веса и стоимости которых указаны в табл. 1.

Суммарный вес предметов превышает грузоподъёмность машины и поэтому требуется эту грузоподъёмность использовать оптимальным образом, то есть взять такие предметы, суммарный вес которых не превышает $Q = 35$, а суммарная стоимость максимальна.

Согласно [25] рассматривается шесть этапов (шагов), на каждом из которых принимается решение брать соответствующий предмет в машину или не брать. Номер этапа соответствует номеру предмета в табл. 1. На каждом этапе всего лишь два возможных

Таблица 1. Исходные данные

Предмет Π_i	Π_1	Π_2	Π_3	Π_4	Π_5	Π_6
Вес q_i	4	7	11	12	16	20
Стоимость c_i	7	10	15	20	27	34

решения (управления): 0 – не брать соответствующий предмет и 1 – брать. Состояние системы перед очередным этапом характеризуется оставшимся ресурсом грузоподъёмности. В [25] задача решается с помощью классического алгоритма Р. Беллмана [1] – разбивается регулярная сетка, в которой на каждом из 6 этапов 36 состояний, и строится оптимальная траектория от «конца к началу».

Заметим, что если строить траекторию от «начала к концу», то после первого этапа есть только 2, после второго – 4 и т.д., а не 36 состояний, а сетка состояний вообще не нужна.

Можно считать состоянием системы уже использованный ресурс, строить все реально достижимые состояния по этапам, вычисляя для каждого из них суммарную стоимость взятых предметов, и при попадании в одно и то же состояние двух (или более) путей оставлять тот, которому соответствует максимальная стоимость.

В рассматриваемой задаче такое состояние возникает после третьего этапа: использовано 11 единиц ресурса. В него приводят два пути: (0, 0, 1) – взять только третий предмет и (1, 1, 0) – взять только два первых. По первому пути суммарная стоимость составляет 15, а по второму пути – 17 (табл. 1). Первый путь и все его продолжения отбраковываются.

Отметим, что при дробных весах предметов двух путей, приводящих в одно и то же состояние, могло и не быть, если не округлять веса, то есть не притягиваться к регулярной сетке, что сопряжено с ошибками. Однако динамическое программирование с отбраковкой состояний эффективно и в этом случае.

Рассмотрим два состояния после четвёртого шага: путь (1, 0, 0, 1) – взяли только первый и четвёртый предмет и путь (0, 1, 1, 0) – взяли только второй и третий предмет.

Для первого из них использовано 16 единиц веса ($4 + 0 + 0 + 12$) и получена суммарная стоимость 27 ($7 + 0 + 0 + 20$), а для второго использовано 18 единиц веса ($0 + 7 + 11 + 0$) и получена стоимость 25 ($0 + 10 + 15 + 0$). Второе состояние 18 (25) (использованный ресурс и в скобках суммарная стоимость) бесперспективно и может быть отбраковано, так как имея запас ресурса грузоподъёмности проще размещать оставшиеся предметы, а возможности выбора те же.

На пятом этапе бесперспективно состояние 22 (32) (так как есть состояние 20 (34)), а также состояния 27 (42), 30 (45) и 34 (52). Вообще после пятого этапа останется только 15 (а не 32 и не 36) состояний. Поэтому алгоритм с отбраковкой состояний в данной задаче эффективнее классического алгоритма Р. Беллмана.

С шестым предметом весом 20 и стоимостью 34 единицы всё просто. Если его не брать, то наилучшим окажется состояние 35 (57), иначе можно получить состояние 35 (56).

Оптимальный вариант загрузки машины состоит в том, что надо взять предметы с номерами 2, 4 и 5 общим весом 35 и стоимостью 57.

4. Отбраковка состояний в двухпараметрических задачах

Увеличение числа параметров состояния резко увеличивает объём вычислений при реализации классического алгоритма динамического программирования и может создать

вычислительные трудности даже при использовании современных персональных компьютеров. В значительной мере эти трудности можно преодолеть при решении задач, допускающих отбраковку состояний.

Рассмотрим задачу о загрузке транспортного средства в следующей постановке. Имеется N различных предметов, каждый в нескольких экземплярах. Вес, объем и стоимость каждого предмета известны. Нужно выбрать предметы так, чтобы при загрузке ими транспортного средства, грузоподъемность которого равна W , а вместительность равна V , суммарная стоимость этого набора была максимальной. Задача формализуется следующим образом: найти $\max \sum_{i=1}^N k_i c_i$ при ограничениях

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N k_i v_i \leq V, \\ \sum_{i=1}^N k_i w_i \leq W, \\ k_i \geq 0, \end{cases}$$

где c_i , v_i , w_i – соответственно, стоимость, объем и вес i -го предмета, k_i – количество взятых предметов i -го вида. Предполагается, что количество предметов каждого вида достаточно для загрузки транспортного средства при использовании только этого вида предметов. Как вариант может рассматриваться задача при ограничениях $k_i \leq k_i^{\max}$.

Неизвестными являются значения k_i .

Очередной этап – это определение числа предметов соответствующего вида в дополнение к тем, которые уже выбраны. Состояние системы формализуется двумя параметрами: суммарные вес и объем уже выбранных предметов.

Рассматриваемая задача однокритериальная, так как требуется максимизировать суммарную стоимость при ограничении на суммарные объем и вес. Мы будем рассматривать её как трехкритериальную задачу: первый критерий – суммарная стоимость выбранных предметов (нужен максимум), а второй и третий – суммарные использованные вес и объем (нужен минимум).

Задача решается с помощью изложенного выше алгоритма динамического программирования с отбраковкой состояний, то есть с формированием на каждом этапе множества Парето трёхкритериальной задачи.

Были выполнены сопоставительные расчёты по новому алгоритму и классическому алгоритму Р. Беллмана (без разбиения регулярной сетки состояний и с отбраковкой бесперспективных путей, приводящих в конкретное состояние). Последовательно увеличивалось число предметов, и выполнялся расчёт при фиксированной грузоподъемности 600 единиц веса и вместительности 500 единиц объема. Исходные данные получались как псевдослучайные числа. Они представлены в табл. 2, а результаты – в табл. 3.

Расчёты по двум программам производились на персональном компьютере с процессором Intel Core 2 DUO2400 МГц и оперативной памятью 2048 МБ.

Таблица 2. Исходные данные для решения задачи

Предметы				
№	Предмет	Вес	Объем	Стоимость
1	П ₁	31	83	11
2	П ₂	45	18	96
3	П ₃	86	49	27
4	П ₄	97	59	72
5	П ₅	22	9	61
6	П ₆	89	22	38
7	П ₇	54	20	60
8	П ₈	91	86	87
9	П ₉	10	49	72
10	П ₁₀	80	85	20
11	П ₁₁	50	96	94
12	П ₁₂	35	11	80
13	П ₁₃	96	62	9
14	П ₁₄	12	13	35
15	П ₁₅	37	9	38
16	П ₁₆	67	65	62
17	П ₁₇	52	74	1
18	П ₁₈	96	89	9
19	П ₁₉	35	48	59
20	П ₂₀	75	70	90
21	П ₂₁	84	35	42
22	П ₂₂	91	23	66
23	П ₂₃	80	91	68
24	П ₂₄	48	72	16
25	П ₂₅	79	34	38
26	П ₂₆	65	33	41
27	П ₂₇	43	37	61
28	П ₂₈	59	43	34
29	П ₂₉	16	17	83
30	П ₃₀	57	22	93

Из табл. 3 следует вывод о более высокой эффективности нового алгоритма по сравнению с классическим алгоритмом Р. Беллмана при решении двухпараметрических задач данного типа. Важно отметить, что с ростом размерности задачи различие этих алгоритмов, как по объёму памяти, так и по времени счёта возрастает. Так уже при числе предметов равном 30 новый алгоритм работает в 52 раза быстрее.

Дополнительно были выполнены расчёты при большем количестве предметов. Их результаты приведены в табл. 4.

Характерно, что при малом числе предметов (3 и 4) классический алгоритм эффективнее нового, так как при этом число отбракованных состояний относительно невелико и затраты времени на их поиск больше, чем эффект от их отбраковки.

Таблица 3. Результаты расчётов

Количество предметов (шт.)	Динамическое программирование (метод Р. Беллмана)		Динамическое программирование с отбраковкой состояний	
	Количество состояний	Время счета (сек)	Количество состояний	Время счета (сек)
3	303	0.02	61	0.05
4	865	0.03	88	0.06
5	1 316	0.14	116	0.14
6	5 264	0.59	144	0.20
7	15 689	3.04	172	0.23
8	18 961	6.63	201	0.25
9	21 454	8.67	423	0.27
10	23 514	11.02	646	0.30
11	28 621	14.03	869	0.33
12	32 013	17.81	1 967	0.53
13	58 214	22.64	3 065	0.84
14	86 213	28.78	6 216	3.65
15	107 501	36.59	8 270	7.91
16	160 640	46.52	10 040	8.86
17	212 562	59.14	11 809	9.72
18	283 504	75.18	13 578	10.28
19	352 981	95.58	15 347	11.56
20	479 248	121.51	17 116	12.23
21	547 665	154.47	18 885	13.12
22	618 956	196.37	20 654	14.02
23	717 536	249.63	22 423	14.79
24	774 144	317.34	24 192	15.52
25	856 713	403.43	25 961	16.44
26	970 552	512.85	27 730	17.57
27	1 115 954	651.97	29 499	19.01
28	1 250 720	828.82	31 268	20.05
29	1 622 112	1 053.63	33 794	23.53
30	1 816 000	1 339.43	36 320	25.30

Таблица 4. Результаты расчётов при большом числе предметов

Количество предметов (шт.)	Динамическое программирование (метод Р. Беллмана)		Динамическое программирование с отбраковкой состояний	
	Количество состояний	Время счета (сек)	Количество состояний	Время счета (сек)
50	7 409 484	7 314.21	145 284	138.97
75	10 589 540	8 580.46	203 645	156.80
100	13 871 196	10 773.10	256 874	189.52
150	21 588 545	13 108.23	392 519	226.65

Рассмотренными примерами список задач, в которых целесообразно использовать динамическое программирование с отбраковкой состояний, далеко не исчерпывается. Так, известная задача об оптимальном распределении финансовых ресурсов между конкурирующими инвестиционными проектами описывается той же моделью, что

и задача о рюкзаке (1) и может быть решена с использованием изложенного выше алгоритма.

Задача выбора поставщиков товара, поставляемого партиями различного объёма и стоимости, отличается от задачи об оптимальной загрузке транспортных средств (2) только знаком неравенства – ограничения на суммарный вес – и тем, что вместо максимизации требуется минимизация, что не мешает использованию алгоритма с отбраковкой состояний.

Заключение

В итоге можно констатировать следующее:

1. Сформулированные выше условия применимости алгоритма с отбраковкой состояний выполняются для многих задач.

2. Число бесперспективных состояний и, соответственно, эффективность нового алгоритма по сравнению с классическим алгоритмом Р. Беллмана трудно оценить теоретически. Она зависит от конкретной математической модели и конкретных числовых значений исходных данных.

3. Для задач, допускающих отбраковку состояний:

- планирование использования частично возобновляемых ресурсов [26];
- расчёт оптимальных сроков замены оборудования;
- выбор способов (механизмов) для производства работ для определения эффективности нового алгоритма требуются экспериментальные расчёты.

4. В задачах, допускающих отбраковку состояний, новый алгоритм можно рекомендовать при большой размерности задачи, когда классический алгоритм Р. Беллмана оказывается неприемлемым из-за больших затрат машинного времени. В таких случаях новый алгоритм может дать снижение объёма используемой памяти и времени счёта, но класс таких задач существенно уже, чем для классического алгоритма. В частности, если исходная задача непрерывная и дискретность вводится искусственно [3, 27], то приходится разбивать регулярную сетку и использовать классический алгоритм Р. Беллмана [1, 7].

Литература:

1. Беллман Р. Динамическое программирование. М.: ИЛ., 1960. 402 с.
2. Ляховский В.Н., Михалевич В.С., Быков В.И. Определение на ЭВМ наивыгоднейшего положения красной линии продольного профиля на вольном ходу. *Транспортное строительство*. 1962;4:41-43.
3. Михалевич В.С., Шор Н.З. Математические основы решения задачи выбора оптимального очертания продольного профиля. *Труды Всесоюзного НИИ транспортного строительства*. 1964;51:12-14.
4. Михалевич В.С. Последовательные алгоритмы оптимизации и их применение. *Кибернетика*. 1965;1:45-56.
5. Михалевич В.С., Быков В.И., Сибирко А.Н. К вопросу проектирования оптимального продольного профиля дороги. *Транспортное строительство*. 1975;6:39-40.
6. Космин В.В., Струченков В.И., Фрадков Е.Б. Проектирование продольного профиля дороги на ЭВМ. *Транспортное строительство*. 1971;4:38-42.
7. Беллман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования. М.: Наука, 1965. 460 с.
8. Лежнев А.В. Динамическое программирование в экономических задачах. М.: Бином, 2010. 176 с.
9. Кремер Н.Ш. Исследование операций в экономике. М.: Юрайт, 2012. 430 с. ISBN 978-5-9916-1849-6
10. Cavagnari G., Marigonda A., Piccoli B. Generalized dynamic programming principle and sparse mean-field control problems. *J. Math. Anal. Appl.* 2020;481(1): Article No. 123437.
<https://doi.org/10.1016/j.jmaa.2019.123437>

11. Ramahatana F., David M. Economic optimization of micro-grid operations by dynamic programming with real energy forecast. *J. Phys. Conf.* 2019;1343(1): Article No. 012067.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1343/1/012067>
12. Firdausiyah N., Taniguchi E., Qureshi A.G. Impacts of Urban Consolidation Centres for Sustainable City Logistics Using Adaptive Dynamic Programming Based Multi-Agent Simulation. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019;328(1): Article No. 012071.
<https://doi.org/10.1088/1755-315/328/1/012071>
13. He S., Shin H.-S., Tsourdos A. Computational guidance using sparse Gauss-Hermite quadrature differential dynamic programming. *IFAC-PapersOnLine*. 2019;52(12):13-18.
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.062>
14. He S., Guo S., Chen, K., Deng L., Liao Z., Xiong F., Yin J. Dataset for reservoir im-poundment operation coupling parallel dynamic programming with importance sampling and suc-cessive approximation. *Data in Brief*. 2019;26: Article No. 104440.
<https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104440>
15. Fayaed S.S., Fiyadh S.S., Khai W.J., Ahmed A.N., Afan H.A., Ibrahim R.K. Improving dam and reservoir operation rules using stochastic dynamic programming and artificial neural network integration model. *Sustainability*. 2019;11(19):5367.
<https://doi.org/10.3390/su11195367>
16. Işık H., Sintunavarat W. An investigation of the common solutions for coupled systems of functional equations arising in dynamic programming. *Mathematics*. 2019;7(10):977.
<https://doi.org/10.3390/math7100977>
17. Jia S., Sun J.Q., Ding Q. Flutter Control of a Two-dimensional Airfoil based on Adaptive Dynamic Programming. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019;531(1): Article No. 012033.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/531/1/012033>
18. Kozłowski K.M., Sharma G.K., Chen J.J., Qi L., Osann K., Jing J.C., Ahuja G.S. Dynamic programming and automated segmentation of optical coherence tomography images of the neonatal subglottis: Enabling efficient diagnostics to manage subglottic stenosis. *J. Biomed. Opt.* 2019;24(9):096001.
<https://doi.org/10.1117/1.JBO.24.9.096001>
19. Durdán, M., Kačur, J., Laciak, M., Flegner, P. Thermophysical properties estimation in annealing process using the iterative dynamic programming method and gradient method. *Energies*. 2019;12(17):3267.
<https://doi.org/10.3390/en12173267>
20. Wang P., Peng Y., Gao X.-J., Gao H.-H. Train Speed Trajectory Optimization using Dynamic Programming with speed modes decomposition. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019;569(4):042019.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/569/4/042019>
21. Ikeda S., Ooka, R. Comparison of metaheuristics and dynamic programming for district energy optimization. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019;294(1):9.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/294/1/012040>
22. Narendra Kumar P.V., Chengaiah C., Prasad J.V.K. Fuzzy dynamic programming based solarthermal load scheduling of Andhra Pradesh power generation using Matlab. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. 2019;8(2S8):1242-1247.
<https://doi.org/10.35940/ijrte.B1046.0882S819>
23. Карпов Д.А., Струченков В.И. Динамическое программирование как метод сплайн-аппроксимации в САПР линейных сооружений. *Российский технологический журнал*. 2019;7(3):77-88.
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-3-77-88>
24. Романовский И.В. Дискретный анализ. СПб.: Невский Диалект, БХВ – Петербург, 2003. 320 с. ISBN 5-7940-0114-3
25. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. М.: КноРус, 2010. 191 с. ISBN 978-5-406-00682-5
26. Косоруков О.А., Мищенко А.В. Исследование операций: Учебник для вузов. М.: Экзамен, 2013. 445 с. ISBN 5-94692-363-3
27. Струченков В.И. Использование параболических сплайнов в САПР линейных сооружений. *Российский технологический журнал*. 2018;6(1):40-52.
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-1-40-52>

References:

1. Bellman R. Dinamicheskoe programmirovaniye (Dynamic programming). Moscow: Inostrannaya literatura Publ., 1960. 402 p. (in Russ.).
2. Lyakhovskii V.N., Mikhalevich V.S., Bykov V.I. Determination on the computer of the most advantageous position of the red line of the longitudinal profile on the free run. *Transportnoe stroitel'stvo = Transport Construction*. 1962;4:41-43.

3. Mikhalevich V.S., Shor N.Z. The mathematical foundations of solving the problem of choosing the optimal outline of the longitudinal profile. *Trudy Vsesoyuznogo NII transportnogo stroitel'stva = Proceedings of the Institute of Transport Construction*. 1964;51:12-24 (in Russ.).
4. Mikhalevich V.S. Sequential optimization algorithms and their application. *Kibernetika*. 1965;1:45-56 (in Russ.).
5. Mikhalevich V.S., Bykov V.I., Sibirko A.N. To the question of designing the optimal longitudinal profile of the road. *Transportnoe stroitel'stvo = Transport Construction*. 1975;6:39-40 (in Russ.).
6. Kosmin V.V., Struchenkov V.I., Fradkov E.B. Computeraided longitudinal road profile design. *Transportnoe stroitel'stvo = Transport Construction*. 1971;4:38-42 (in Russ.).
7. Bellman R., Dreifus S. *Prikladnye zadachi dinamicheskogo programmirovaniya* (Applied problems of dynamic programming). Moscow: Nauka; 1965. 460 p. (in Russ.).
8. Lezhnev A.V. *Dinamicheskoe programmirovanie v ekonomicheskikh zadachakh* (Dynamic programming in economic problems). Moscow: Binom; 2016. 176 p.
9. Kremer N.Sh. *Issledovanie operatsii v ekonomike* (The study of operations in the economy). Moscow: Yurait; 2012. 430 p. ISBN 978-5-9916-1849-6
10. Cavagnari G., Marigonda A., Piccoli B. Generalized dynamic programming principle and sparse meanfield control problems. *J. Math. Anal. Appl.* 2020;481(1): Article No. 123437.
<https://doi.org/10.1016/j.jmaa.2019.123437>
11. Ramahatana F., David M. Economic optimization of micro-grid operations by dynamic programming with real energy forecast. *J. Phys. Conf.* 2019;1343(1): Article No. 012067.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1343/1/012067>
12. Firdausiyah N., Taniguchi E., Qureshi A.G. Impacts of Urban Consolidation Centres for Sustainable City Logistics Using Adaptive Dynamic Programming Based MultiAgent Simulation. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019;328(1): Article No. 012071.
<https://doi.org/10.1088/1755-315/328/1/012071>
13. He S., Shin H.-S., Tsourdos A. Computational guidance using sparse Gauss-Hermite quadrature differential dynamic programming. *IFAC-PapersOnLine*. 2019;52(12):13-18.
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.062>
14. He S., Guo S., Chen K., Deng L., Liao Z., Xiong F., Yin J. Dataset for reservoir impoundment operation coupling parallel dynamic programming with importance sampling and successive approximation. *Data in Brief*. 2019;26: Article No. 104440.
<https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104440>
15. Fayaed S.S., Fiyadh S.S., Khai W.J., Ahmed A.N., Afan H.A., Ibrahim R.K. Improving dam and reservoir operation rules using stochastic dynamic programming and artificial neural network integration model. *Sustainability*. 2019;11(19):5367.
<https://doi.org/10.3390/su11195367>
16. Işık H., Sintunavarat W. An investigation of the common solutions for coupled systems of functional equations arising in dynamic programming. *Mathematics*. 2019;7(10):977.
<https://doi.org/10.3390/math7100977>
17. Jia S., Sun J.Q., Ding Q. Flutter Control of a Two-dimensional Airfoil based on Adaptive Dynamic Programming. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019;531(1): Article No. 012033.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/531/1/012033>
18. Kozłowski K.M., Sharma G.K., Chen J.J., Qi L., Osann K., Jing J.C., Ahuja G.S. Dynamic programming and automated segmentation of optical coherence tomography images of the neonatal subglottis: Enabling efficient diagnostics to manage subglottic stenosis. *J. Biomed. Opt.* 2019;24(9):096001.
<https://doi.org/10.1117/1.JBO.24.9.096001>
19. Durdán, M., Kačur, J., Laciak, M., Flegner, P. Thermophysical properties estimation in annealing process using the iterative dynamic programming method and gradient method. *Energies*. 2019;12(17):3267.
<https://doi.org/10.3390/en12173267>
20. Wang P., Peng Y., Gao X.-J., Gao H.-H. Train Speed Trajectory Optimization using Dynamic Programming with speed modes decomposition. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019;569(4):042019.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/569/4/042019>
21. Ikeda S. Ooka, R. Comparison of metaheuristics and dynamic programming for district energy optimization. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019;294(1):9.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/294/1/012040>
22. Narendra Kumar P.V., Chengaiah C., Prasad J.V.K. Fuzzy dynamic programming based solarthermal load scheduling of Andhra Pradesh power generation using Matlab. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. 2019;8(2S8):1242-1247.
<https://doi.org/10.35940/ijrte.B1046.0882S819>
23. Karpov D.A., Struchenkov V.I. Dynamic Programming as a Method of Spline Approximation in the CAD Systems of Linear Constructions. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2019;7(3):77-88 (in Russ.).
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-3-77-88>

24. Romanovskii I.V. *Diskretnyi analiz* (Discrete analysis). St. Petersburg: Nevskii Dialekt, BKhV–Peterburg; 2003. 320 p. (in Russ.). ISBN 5-7940-0114-3
25. Venttsel' E.S. *Issledovanie operatsii: zadachi, printsipy, metodologiya* (Operations research: tasks, principles, methodology). Moscow: KnoRus; 2010. 191 p. (in Russ.). ISBN 978-5-406-00682-5
26. Kosorukov O.A., Mishchenko A.V. *Issledovanie operatsii: Uchebnik dlya vuzov* (Operations Research). Moscow: Ekzamen; 2013. 445 p. (in Russ.). ISBN 5-94692-363-3
27. Struchenkov V.I. The use of parabolic splines in CAD of linear structures. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2018;6(1):40-52 (in Russ.).
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-1-40-52>

Об авторах:

Карпов Дмитрий Анатольевич, кандидат технических наук, заведующий кафедрой общей информатики Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Струченков Валерий Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры общей информатики Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the authors:

Dmitry A. Karpov, Cand. Sci. (Engineering), Head of the Department of General Informatics of the Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Valeriy I. Struchenkov, Dr. Sci. (Engineering), Professor of the Department of General Informatics of the Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Поступила: 26.12.2019; Получена после доработки: 20.01.2020; Принята к опубликованию: 06.07.2020.

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-4-112-128>



УДК 378

О совершенствовании механизмов подготовки научно-педагогических кадров и перспективы целевого обучения в интересах вузов

**С.А. Кудж,
Н.Б. Голованова[@]**

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: golovanova@mirea.ru

В статье на основе анализа нормативно-правовой базы, научной литературы, статистических данных и имеющегося опыта организации образовательной деятельности по инженерно-техническим направлениям подготовки рассматриваются основные тенденции и проблемы обеспечения педагогическими и научными кадрами в вузах, дается характеристика целевого обучения как инструмента управления подготовкой кадров.

В числе основных факторов, снижающих сегодня качество подготовки кадров высшей квалификации для национальной экономики и вызывающих серьезную озабоченность, как со стороны органов управления в сфере высшего образования, так и администрации университетов, справедливо называют дефицит научно-педагогических кадров, способных при быстроизменяющихся потребностях рынка труда и интересах обучающихся оперативно перестраивать образовательный учебный процесс, используя для этого эффективные передовые технологии [1]. Отсутствие интереса к проведению научных исследований со стороны преподавательского состава, вызванное, с одной стороны, возросшей конкуренцией за получение грантов, целевых субсидий на проведение фундаментальных и прикладных исследований, с другой стороны – неспособностью (отсутствием навыков) многих претендентов грамотно и своевременно оформить заявку на получение финансирования, приводит к снижению показателей научно-исследовательской деятельности.

Формулируется вывод о необходимости выработки и принятия мер, обеспечивающих привлечение способных, хорошо подготовленных и профессионально вовлеченных молодых людей на преподавательские должности и должности научных сотрудников. Одним из механизмов реализации таких мер может стать организация целевого обучения в интересах образовательной организации, позволяющей выстроить процесс подготовки молодых специалистов, начиная от старшеклассников – выпускников школ.

Ключевые слова: целевая подготовка, целевое обучение, инженерно-техническое образование и наука, системная работа.

Для цитирования: Кудж С.А., Голованова Н.Б. О совершенствовании механизмов подготовки научно-педагогических кадров и перспективы целевого обучения в интересах вузов. *Российский технологический журнал*. 2020;8(4):112-128. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-4-112-128>

On improving training mechanisms teaching staff and prospects for targeted learning in the interests of universities

Stanislav A. Kudzh,
Nataliya B. Golovanova@

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia
@Corresponding author, e-mail: golovanova@mirea.ru

The article reveals the main trends and staffing impediments in higher educational institutions based on the analysis of legislation and standards, academic literature, statistics and the available management experience of educational activities in engineering training areas. The targeted training attributes as a framework for vocational training management are also specified in the paper.

Shortage of academic staff capable to use the efficient advanced technologies for rebuilding the training process quickly under changing both labor market environment and students' interests is one of the main factors that today compromises the quality of highly qualified personnel training for the national economy causing serious concern of higher education authorities and educational institutions administration. The lack of interest of academic staff to conduct scientific researches due to on the one hand, by the increased competition for grants, targeted subsidies for fundamental and applied research and the inability (lack of skills) of many applicants to apply for funding correctly and timely, on the other hand contributes to low indicators of the research activities.

The authors have concluded that the targeted training, which allows organizing the training process for young professionals starting from high school graduates, could be the main framework for recruiting them to teaching and researching positions that is undoubtedly to the benefit of an educational institution.

Keywords: targeted training, specialized training, engineering education and science, systematic work.

For citation: Kudzh S.A., Golovanova N.B. On improving training mechanisms teaching staff and prospects for targeted learning in the interests of universities. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = *Russian Technological Journal*. 2020;8(4):112-128 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-4-112-128>

Введение

Майские Указы Президента Российской Федерации от 07 мая 2012 года № 597 «О мероприятиях по реализации государственной социальной политики» [2] и № 599 «О мерах по реализации государственной политики в области образования и науки» [3], а также масштабные национальные проекты «Образование» и «Наука» определили целый ряд новых требований к качеству высшего образования. Среди них – создание возможностей для построения индивидуальной образовательной траектории; изменение системы целевой подготовки; снижение административных барьеров как основы усиления практико-ориентированного образовательного процесса и получения практических знаний на предприятиях. Одновременно был решен вопрос об обеспечении конкурентоспособной оплаты труда профессорско-преподавательского состава, реализованы крупные проекты по обновлению материально-технической базы образовательных организаций.

Безусловно, проведенный комплекс мероприятий позволил обратить внимание на то, что научно-техническое и технологическое развитие как фактор «университетского» роста и повышения конкурентоспособности российского образования выходит на новый уровень, обеспечивший не только эффективное решение внутренних задач, но и вхождение ряда российских вузов в международные рейтинги университетов.

Однако, несмотря на принятые и принимаемые меры, весьма серьезной остается кадровая проблема образовательных организаций, прежде всего в части категорий профессорско-преподавательского состава (ППС) и научных работников. Только за последние два года наблюдается рост среднего возраста ППС вузов, происходящий за счет сокращения численности молодых работников (и снижения удельного веса данной категории в общей численности ППС) (рис. 1). При сокращении численности работников образовательных организаций в 2019 г. по сравнению с 2017 г. на 7%, численность педагогических работников, занимающих должности ассистента и преподавателя, сократилась больше, почти на 9.4% (!). За этот же период произошло (правда, не столь большое, всего на 1.3%), сокращение численности научных работников. Кроме сокращения численности молодых научно-педагогических кадров, статистика указывает и на снижение качественных характеристик. Так, численность ассистентов и преподавателей, имеющих ученую степень, сократилась на 28.8% (!)

Можно предположить, что в более сложном положении находятся образовательные организации, имеющие техническую специализацию. Падение престижа инженерно-технического труда, существенное технико-технологическое отставание российской экономики от экономики развитых стран закономерно делают непривлекательной профессиональную деятельность и слабый во всех отношениях приток молодежи. На должности ППС на технические кафедры все труднее найти профессионально грамотных, креативно

настроенных, перспективных молодых людей, которые смогут передать знания студентам, увлечь их в проектную, исследовательскую, инновационную деятельность.

РТУ МИРЭА является одним из крупнейших технических вузов Российской Федерации. Понимая значимость качества научно-педагогических кадров для эффективной реализации основных направлений деятельности, Университет осуществляет целый комплекс мероприятий по привлечению молодых специалистов, вовлечению их в деятельность и закреплению в трудовом коллективе. Однако, несмотря на принимаемые меры кадровые проблемы РТУ МИРЭА во многом схожи со среднероссийскими тенденциями (рис. 2).

При сравнении двух распределений совершенно четко видно, что и в том и в другом случае распределение ППС по возрасту имеет бимодальный вид. Здесь также наиболее многочисленной и в абсолютном, и в относительном выражении является

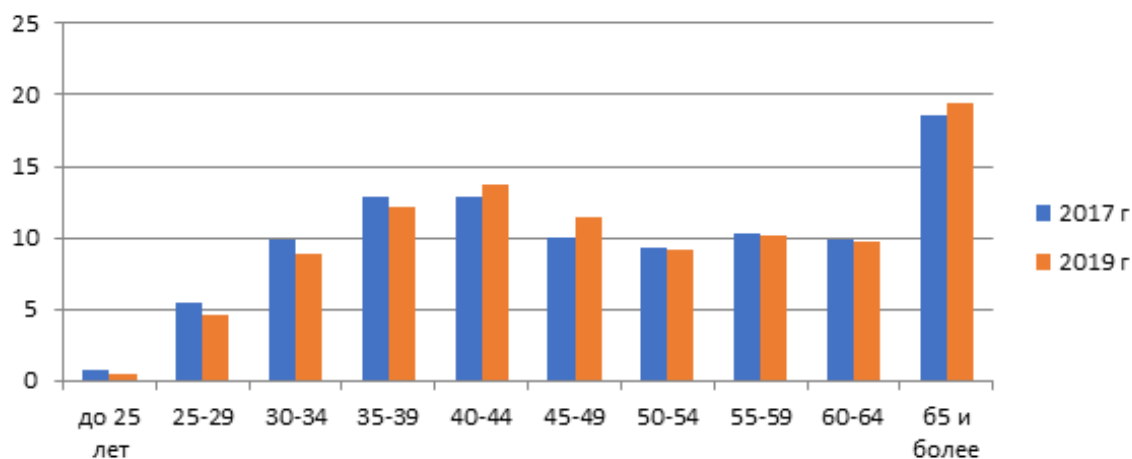


Рис. 1. Распределение основного (штатного) профессорско-преподавательского персонала образовательных организаций высшего образования по возрастным группам (в процентах к итогу).

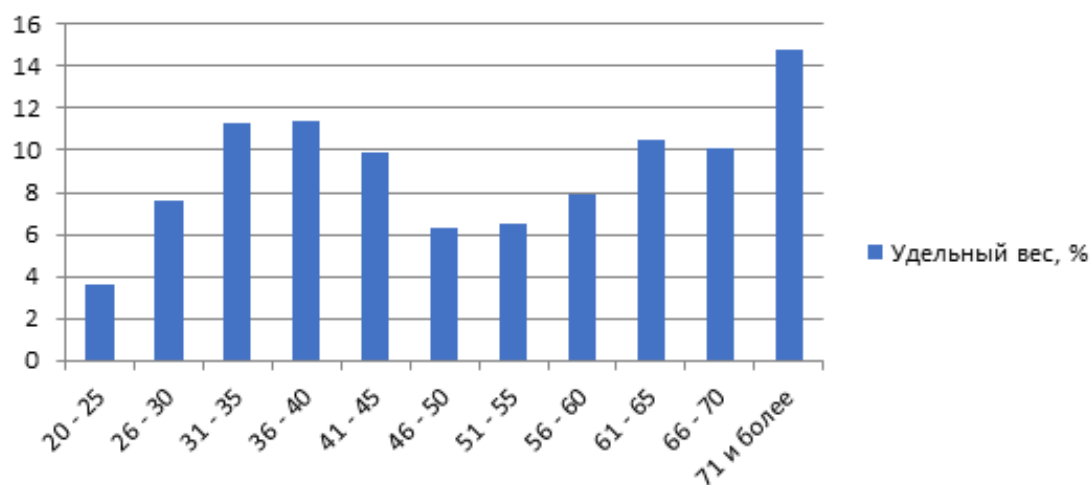


Рис. 2. Распределение основного профессорско-преподавательского персонала РТУ МИРЭА по возрастным группам (человек).

возрастная группа ППС старше 65 лет. Но по сравнению со среднероссийским распределением, в котором второе модальное значение находится в возрастном интервале 40–44, в РТУ МИРЭА второе модальное значение находится в возрастной группе 36–40.

Сложившиеся в течение многих лет закономерности формирования профессорско-преподавательского состава вузов в условиях усложняющихся требований к качеству подготовки в организациях высшего образования порождают целый ряд проблем, особенно остро проявляющихся при формировании педагогических кадров по инженерно-техническим направлениям подготовки и специальностям и все больше препятствующих позитивному развитию образовательной и научной деятельности вузов. К числу основных следует отнести:

- увеличивающийся разрыв между быстропроисходящими внешними изменениями, требующими оперативной корректировки образовательного контента, и возможностями преподавателей старших возрастов адаптироваться к происходящим изменениям;
- все больше проявляющееся отсутствие заинтересованности у старшего поколения в подготовке «молодой смены», в лице которой они видят для себя в определенной степени конкурентов;
- инерционность мышления преподавателей старших возрастов, неприятие каких-либо изменений и уверенность в незыблемости существовавших долгое время подходов к подготовке кадров.

В тоже время преподавательская и научно-исследовательская деятельность в вузе для большинства молодых людей остается малопривлекательной (даже при относительно высокой оплате труда). Во многих случаях это проявляется уже в период обучения в вузе и выражается в отсутствии у большинства студентов мотивации заниматься научными или прикладными исследованиями, научно-техническим творчеством. Но именно молодые люди обладают качествами, которые сегодня так необходимы современному вузу: инновационная направленность поведения персонала; его ориентированность на коммерциализацию результатов деятельности; способность перестраиваться в соответствии с меняющимися обстоятельствами и быстро адаптироваться к новым технологическим решениям, которые будут внедряться через 3–5 лет и т.д.

Решение обозначенных выше проблем ставит перед образовательными организациями задачу поиска и формирования иного, отличного от традиционного, подхода к привлечению молодых кадров для работы в вузе. Весьма перспективным в этом отношении представляется использование механизма целевой подготовки, осуществляемой в интересах образовательной организации. Такая возможность у вузов появилась в связи с внесением изменений в Федеральный закон «Об образовании в Российской Федерации». Так, в п. 2 статьи 71.1 закона «Об образовании в Российской Федерации» теперь сказано, что договор о целевом обучении может быть заключен «с...2) государственными и муниципальными учреждениями, унитарными предприятиями» [4].

Это позволяет считать, что образовательная организация высшего образования, являясь государственным учреждением, может быть одним из субъектов договорных отношений и выступать как организация-заказчик.

Методы исследования

Теоретико-методологической основой исследования стали как теоретические (исторической аналогии, анализа и синтеза, сравнения, обобщения, моделирования, системного подхода, системного и категориального анализа, теория принятия решений), так и эмпирические (изучения педагогического опыта, педагогического эксперимента, экспертных оценок) методы. Использовался также метод статистических показателей, включая методы абсолютных, относительных и средних величин, методы наглядного представления информации.

В качестве теоретической основы разработанного подхода и модели механизма целевой подготовки стали методы программно-целевого управления, современные положения которых применительно к сфере образования рассмотрены в трудах Ю.П. Березуцкой, Г.А. Ворониной, О.Б. Дарвиш, И.К. Шалаева и других исследователей [5–8].

При разработке и обосновании предлагаемого к организации целевого обучения подхода в качестве теоретической основы использовался ряд положений теории личности и деятельности, общей теории профессионального образования, сформулированных в трудах С.Я. Батышева, Л.В. Бороздиной, Б.С. Гершунского, Г.И. Ибрагимова, А.Н. Леонтьева, А.М. Новикова, Н.К. Чапаева и др. [9–13]. Как теоретическая база построения системы подготовки научно-педагогических кадров использовалась концепция непрерывного образования, крупнейшими теоретиками которого являются П. Ленгранд, Р. Дейв и др. [14–18].

Тем не менее, стоит отдельно отметить, что в современных исследованиях, посвященных вопросам и проблемам целевого обучения, не освещается вопрос использования его методологии в процессе подготовки инженеров к ведению научно-педагогической деятельности.

История целевой подготовки

Можно считать, что прообраз целевой подготовки был заложен в дореволюционной России, где в XVII веке – первой половине XIX века было введено понятие «казеннокоштные учащиеся». Так назывались учащиеся некоторых учебных заведений, которые обучались и содержались полностью за счёт государственных средств, на «казённый кошт».

Студенты принимались на казённый кошт на основе прошения при условии хорошей успеваемости, хорошего поведения и предъявления свидетельства о бедности, подписанного несколькими лицами благородного происхождения. По окончании обучения они должны были в качестве компенсации расходов государства на их обучение прослужить не менее 6 лет по ведомству Министерства народного просвещения [19].

Казённокоштным студентам предоставлялось жильё, питание, обмундирование, канцелярские принадлежности и учебная литература. Это открывало дорогу к образованию молодым людям из малоимущих слоёв населения.

Существовали и иные способы целевой подготовки (хотя, конечно, в те времена такого понятия еще не существовало). Например, различные ведомства выделяли финансовые средства на содержание воспитанников, чтобы по окончании курса они поступали на службу в данном ведомстве [20]. Были также особые «кавказские казённые воспитанники», обязанные по окончании курса прослужить не менее шести лет на Кавказе.

С момента появления «казеннокоштных учащихся» многое изменилось, однако интерес организации в подготовке работников в своих интересах сохранялся всегда. В советское время термин «казеннокоштные учащиеся» был заменен на работу по распределению, что предполагало обязательное трудоустройство выпускника высшего учебного заведения или среднего специального учебного заведения на определённый срок, как правило, не менее 5 лет. Такой способ обеспечения народного хозяйства кадрами с определенными оговорками вполне может рассматриваться, как разновидность целевой подготовки.

Среди исследователей вопросов целевой подготовки считается, что само понятие «целевая подготовка» появилось в Советском Союзе в 60-е годы. Встречалось оно главным образом в ведомственных актах, при проработке специальных механизмов приема в образовательные организации с учетом интересов народного хозяйства в условиях плановой экономики [21].

В современной России Федеральный закон от 25 июня 2002 г. № 71-ФЗ «О внесении изменений и дополнений в Закон Российской Федерации «Об образовании» и Федеральный закон «О высшем и послевузовском профессиональном образовании» установил, что «Государственные и муниципальные образовательные учреждения среднего профессионального и высшего профессионального образования вправе осуществлять в пределах финансируемых за счет средств учредителя государственных заданий (контрольных цифр) по приему обучающихся их целевой прием в соответствии с договорами с органами государственной власти, органами местного самоуправления в целях содействия им в подготовке специалистов соответствующего уровня образования» [22]. В последующем механизм целевого приема получил отражение в статье 56 Федерального закона «Об образовании в Российской Федерации», вступившего в силу с 1 сентября 2013 года [23, с. 66–68]. И, наконец, было принято Постановление Правительства РФ от 21 марта 2019 г. № 302 «О целевом обучении по образовательным программам среднего профессионального и высшего образования и признании утратившим силу постановления Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2013 г. № 1076» [24]. Принятие данного документа определило новую редакцию статьи 56 закона «Об образовании в Российской Федерации» и имело целью совершенствование механизма целевого обучения в интересах работодателей – бизнеса и государственного сектора.

Обращение к истории целевого обучения вскрывает тот существенный факт, что организация целевого обучения в самого момента его зарождения рассматривалась как элемент государственного управления образованием. И в обобщенном смысле, как в дореволюционной России, и в советское время, так и в современных условиях организация целевой подготовки направлена на решение кадровых вопросов определенных предприятий и организаций, на «доведение» выпускника образовательной организации до заранее намеченного места работы [25, с. 36]. При этом эффективность целевого обучения в основном определялась двумя основными факторами:

- направленностью целевого обучения на решение кадровых задач в ключевых отраслях национальной экономики и оборонно-промышленного комплекса;
- организацией образовательного процесса в тесной взаимосвязи с предприятиями и организациями, являющимися заказчиками на подготовку кадров в своих интересах.

Специализированная целевая подготовка в интересах РТУ МИРЭА

Для образовательной организации, как и для организаций любого другого вида деятельности, заинтересованных в целевой подготовке, целевое обучение студентов – это возможность «получить» молодых специалистов для работы в своей организации.

Для вузов, особенно технической направленности, где приток молодых кадров незначителен и не позволяет решать основных задач кадровой политики, целевая подготовка в своих интересах становится важным механизмом управления персоналом и реализации кадровой политики. Так как основными видами деятельности вуза является образовательная и научно-исследовательская деятельность, то наибольший интерес для вуза представляет ориентация именно на должности по этим категориям персонала.

Для обучающихся основной интерес целевого обучения – это удовлетворение индивидуальных потребностей в интеллектуальном развитии, приобретении определенных, прежде всего, профессиональных компетенций и трудоустройство, которое позволит реализовать желаемую жизненную траекторию.

Очевидно, что подходы к организации целевой подготовки в интересах образовательной организации и модель такой подготовки могут быть различными. Опираясь на многолетний опыт организации образовательной деятельности, прежде всего, в части целевого обучения, опыт проведения ежегодных кампаний по новому набору, принимая во внимание результаты динамического анализа мотивационной структуры абитуриентов, в РТУ МИРЭА была спроектирована трехэтапная многоуровневая модель целевой подготовки в интересах РТУ МИРЭА (рис. 3), реализация которой уже началась.



Рис. 3. Основные этапы целевой подготовки в интересах образовательной организации (РТУ МИРЭА).

Очевидно, что организационным инструментом реализации указанной модели должен стать программно-целевой подход, позволяющий весь процесс целевой подготовки представить как систему намеченных, подлежащих осуществлению мер и действий, проведение которых обеспечит достижение заранее поставленной цели – подготовку высококвалифицированных научно-педагогических кадров для работы в Университете.

Рассмотрим отдельные составляющие системы планируемых мер и действий, охарактеризовав основные составляющие механизма целевой подготовки в интересах РТУ МИРЭА.

Довузовская подготовка. Основной задачей реализации довузовского этапа является отбор претендентов на целевое обучение в интересах РТУ МИРЭА. Целесообразность включения данного этапа связана с тем, что одним из ключевых факторов, ограничивающих приток молодых, способных работников, является непривлекательность инженерно-технической деятельности как таковой и, как следствие, научно-педагогической деятельности в техническом вузе (даже несмотря на достаточно высокий уровень заработной платы). К сожалению, целый ряд факторов социально-экономического характера,

имевших место в последние десятилетия в нашей стране, привел к серьезному падению престижа инженерной деятельности, к снижению, а порой и утрате интереса со стороны школьников старших классов и абитуриентов к техническим и инженерно-техническим направлениям, за исключением IT-образования.

Осуществляя целевую подготовку в своих интересах, вуз стремится не только подготовить профессионально компетентного специалиста, но и существенно повлиять на его профессиональную мотивацию, повысить уровень профессиональной вовлеченности. Формирование указанных качеств далеко не быстрый процесс, который должен начинаться еще до начала профессиональной деятельности и даже профессионального обучения – на этапе выбора направления профессионального образования, то есть довузовском.

В рамках традиционного подхода «контакт» и знакомство заказчика и абитуриента происходит практически непосредственно перед началом приемной кампании. И в большинстве случаев организация-заказчик имеет ограниченные возможности получения полной и достоверной информацией о качествах претендента на целевое обучение, его креативном и исследовательском потенциале, о том, насколько глубок его интерес к выбираемому направлению подготовки и будущей профессиональной деятельности. Указанные задачи позволяет достаточно эффективно решать реализация довузовского этапа. При этом способы и формы взаимодействия определяются той работой, которую образовательная организация проводит в рамках довузовской предпрофессиональной подготовки школьников. В этом отношении РТУ МИРЭА реализует достаточно широкий спектр мероприятий, наиболее масштабными из которых является деятельность детского технопарка «Альтаир», инженерные и химические классы школьников, Университетские субботы и пр. Проведение указанных мероприятий позволяет Университету, с одной стороны, активно развивать интерес у школьников к инженерно-технической деятельности, формировать навыки проектной деятельности, работы в команде. С другой стороны, результаты проектной деятельности, различные конкурсные мероприятия позволяют оценить потенциал участников, выделить из них наиболее способных и увлеченных.

Таким образом, основной результат довузовского этапа целевой подготовки:

- для школьников – это знакомство с потенциальной профессиональной деятельностью и при достижении определенных успехов – получение дополнительных 10 баллов при поступлении в образовательную организацию, шанс заключить соответствующий договор о целевой подготовке в интересах РТУ МИРЭА (рис. 4).

- для Университета – возможность отбора из числа школьников претендентов на заключение договора о целевом обучении с Университетом, формирования «качественного» контингента абитуриентов.

Следует понимать, что старшеклассникам, делающим выбор направления (специальности) будущего профессионального обучения и образовательной организации, чрезвычайно трудно быть уверенным в правильности и окончательности своего профессионального выбора и будущего места работы. Риск, что, отработав положенный договором срок, выпускник вуза захочет сменить вид и род деятельности, велик. Чтобы снизить его, образовательная организация в течение предстоящего периода обучения должна не только сформировать у обучающегося предусмотренные образовательным

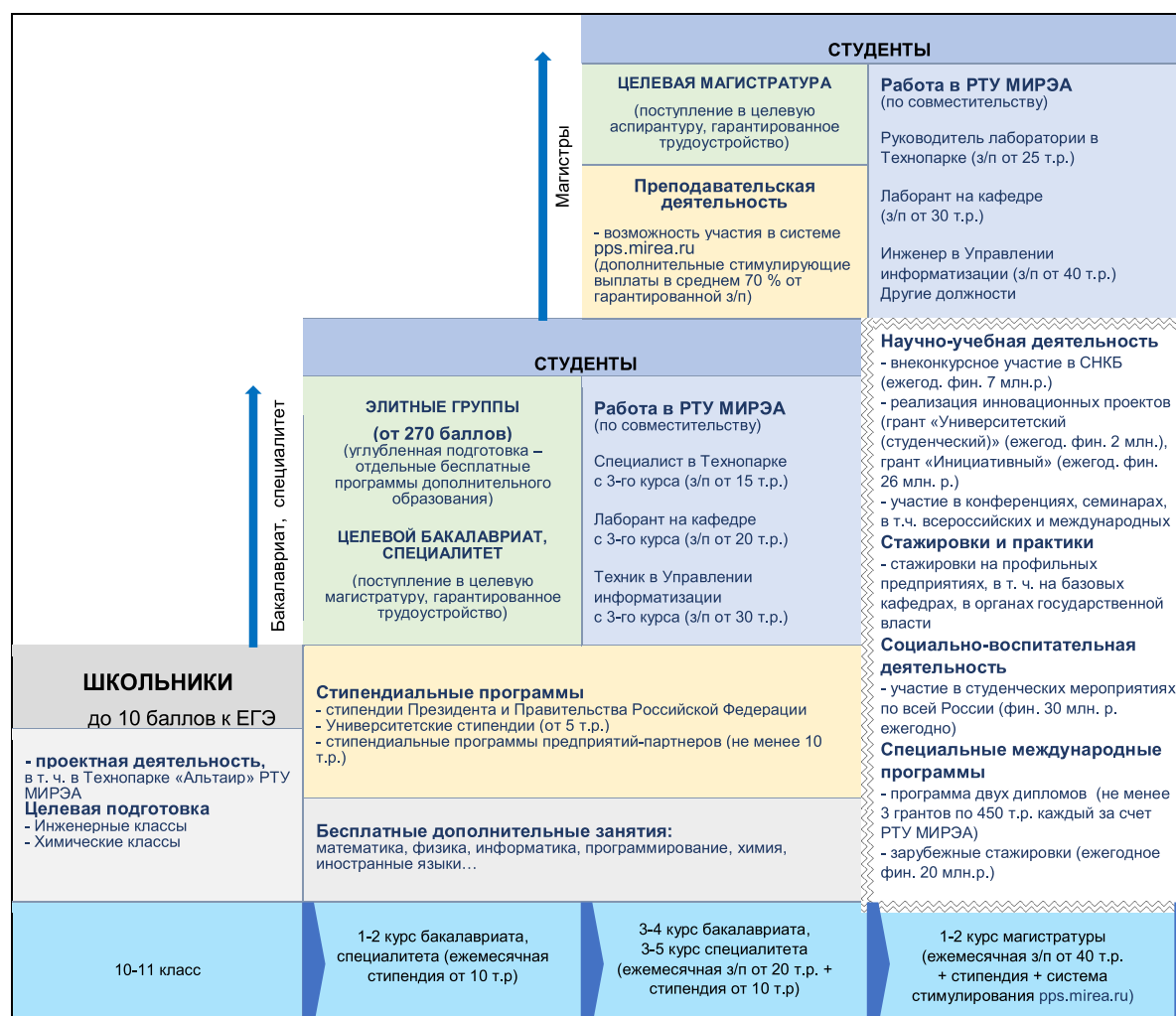


Рис. 4. Карьерная лестница РТУ МИРЭА (нулевой и первый уровень: довузовская и вузовская подготовка).

стандартом компетенции, но и развить и закрепить у него увлеченность и интерес к тому, что предстоит делать в будущем в конкретной организации.

Вузовская подготовка. Второй этап целевой подготовки включает собственно обучение, получение профессионального образования. Это основной этап с точки зрения формирования компетенций будущего специалиста (рис. 5).

Заклучившие договор о целевом обучении получают возможность проходить обучение в специально сформированных элитных группах¹. Кроме этого, студентам этих групп предлагаются различные курсы и программы, которые позволяют сформировать дополнительные компетенции, развить дополнительные навыки и умения. Фактически студенты-целевики обучаются в рамках индивидуальной образовательной программы. Особенность в данном случае заключается в том, что индивидуализация обучения происходит в двух направлениях: в интересах обучающегося по договору о целевом обучении и в интересах образовательной организации как заказчика.

¹ Группы с углубленной подготовкой по дисциплинам основной образовательной программы.

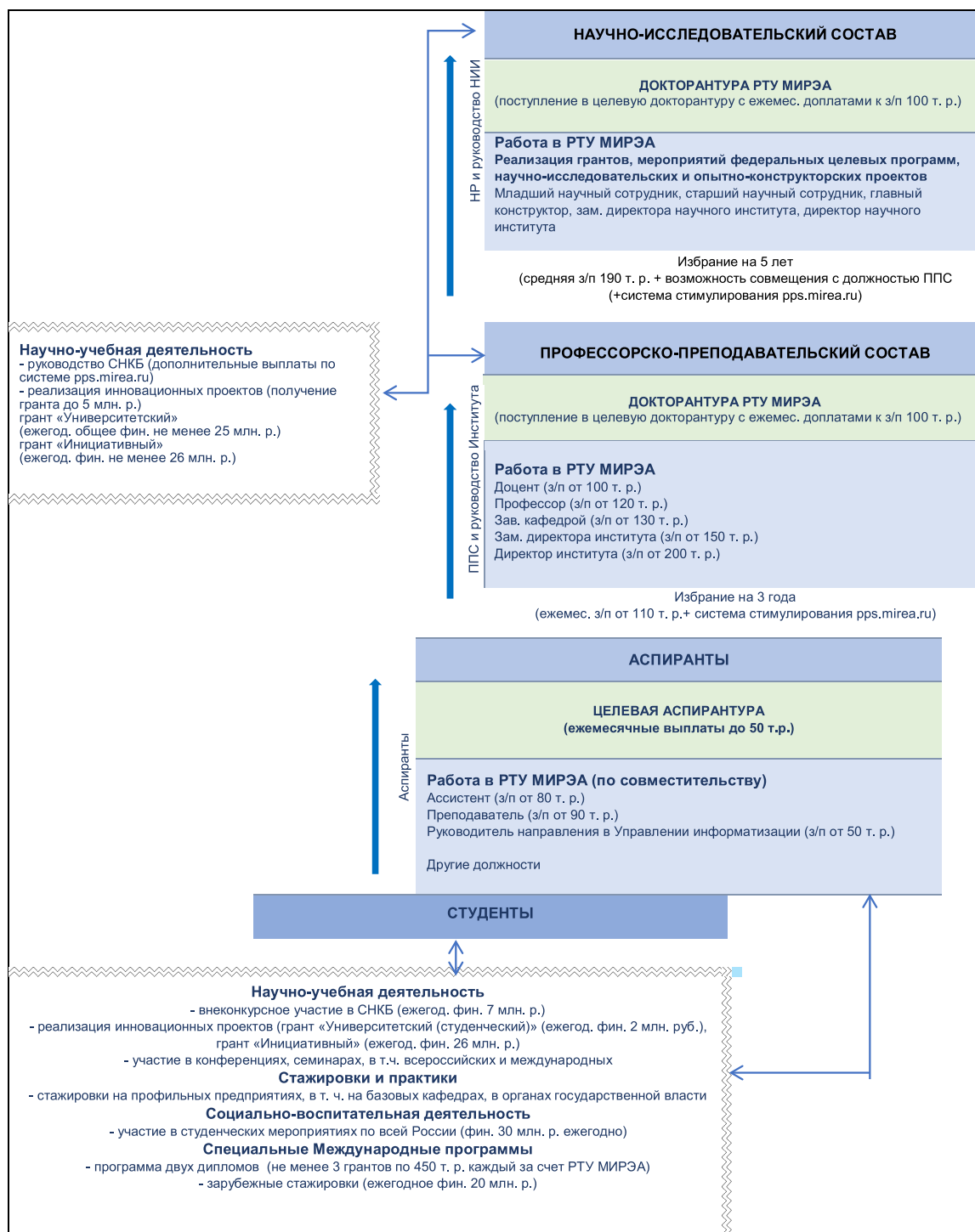


Рис. 5. Карьерная лестница РТУ МИРЭА (второй уровень).

Одной из составляющих целевой подготовки являются различные формы и способы развития практических навыков и умений, которые формируются и развиваются в основном в периоды прохождения практик. Кроме этого, целевикам Университет предлагает стажировки в профильных организациях и предприятиях, возможность решения практических задач, сформулированных сотрудниками профильных предприятий и пр.

Говоря об интересах заказчика, а это образовательная организация, следует обратить внимание, что основной вид ее деятельности – это образовательная деятельность. Вуз заинтересован в том, чтобы по договорам о целевом обучении на работу пришли, прежде всего, молодые педагогические работники. Поэтому важной составляющей целевого обучения должна стать профессионально-педагогическая подготовка. Ее формы и содержание различны в зависимости от уровня подготовки обучающегося. Если это студент бакалавриата, то ему предлагается посещение показательных занятий, знакомство с основами педагогической деятельности. Для обучающихся по программам магистратуры – это занятия по методике преподавания, выполнение функций тьюторов, педагогическая практика.

Важно заметить, что обучение фактически по индивидуальной образовательной траектории вовсе не исключает возможность участия в студенческой научно-исследовательской деятельности, занятий в студенческих конструкторских бюро, в различных профильных и предметных олимпиадах и конкурсах. Такое участие, несомненно, оказывает только самое позитивное влияние на развитие инициативности, стремление участия в жизни студенческого коллектива, формирование будущего специалиста, закрепление у него интереса к будущей деятельности и приверженности своей организации.

Очевидно, что на этапе обучения вуз как организация-заказчик должен создать максимум условий, чтобы подготовить такого работника, который в будущем будет эффективен и полезен, уже в период трудовой деятельности. Чтобы лучше узнать особенности будущей профессиональной деятельности, развивать мотивацию у обучающегося работать именно в данной организации студентам предлагается работа в Университете в соответствии с уровнем их квалификации. Студентам, начиная с 3-го курса бакалавриата или специалитета, предлагается работать по совместительству в структурных подразделениях Университета, в частности:

- в Технопарке «Альтаир», где есть возможность получить и преподавательские навыки, работая со школьниками;
- в Управлении информатизации на должностях учебно-вспомогательного персонала, получая навыки по обслуживанию компьютерной техники, программированию, работы с большими данными и др.;
- на кафедрах и в лабораториях Университета, получая навыки по организации учебного процесса по программам высшего образования, навыки подготовки оборудования для проведения лабораторных работ и практических занятий и др.;
- как ассистент, начиная со 2-го курса магистратуры или обучаясь в аспирантуре.

Спектр трудовых активностей, которые могут быть предложены обучающимся по договорам о целевом обучении, достаточно широк и зависит от уровня целевой подготовки. Наибольшие возможности – у обучающихся в целевой аспирантуре.

Таким образом, организовав целевое обучение, Университет не только решает задачи подготовки кадров для себя, но и обеспечивает решение социальных задач. В частности, начиная уже с первого курса, студентам назначается специальная стипендия. Предоставление работы (начиная с третьего курса) дает возможность обучающимся получать заработную плату. Учеба в целевой аспирантуре открывает возможность как участия в

системе стимулирования деятельности профессорско-преподавательского состава, так и в финансируемой научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельности (рис. 5).

Послевузовское сопровождение и поддержка. После завершения обучения по основной образовательной программе студенты-целевики остаются на работе в Университете.

Здесь очень важно, чтобы как можно быстрее и лучше прошла трудовая адаптация, как можно быстрее появилось чувство причастности к деятельности вуза и ее результатам. От того, какие будут созданы условия работы, в какой атмосфере окажется молодой специалист, зависит его удовлетворенность своей работой и стремление работать с наибольшей отдачей.

Эффективным в этом отношении представляется использование института наставничества. Наставник поможет войти молодому специалисту в уже сформировавшуюся команду (коллектив), ознакомит с существующими в Университете трудовыми правилами и нормами, расскажет о перспективах развития и структурного подразделения, в которое пришел молодой специалист, и самой образовательной организации и т.д.

Любой приходящий в коллектив молодой сотрудник (как и в любом возрасте, но для молодых это особо значимо) имеет свои представления о своем профессиональном будущем, свою стратегию достижения личных долгосрочных целей, свои определенные профессиональные амбиции. С этой точки зрения наставник должен стать тем человеком, который, с одной стороны, сможет понять настрой молодого сотрудника, объяснить, какие есть возможности профессионального роста; с другой стороны, постарается обеспечить необходимые условия для закрепления сотрудника в организации и для наиболее полного развития его потенциала.

Современный университет – это крупная, динамично развивающаяся организационная структура, что создает достаточно широкий спектр возможностей для карьерного роста (рис. 5). Как видно из представленной схемы, это может быть и вертикальное, и горизонтальное продвижение по карьерной лестнице. Немаловажным фактором привлечения молодых людей и их закрепления в образовательной организации является прозрачность имеющихся у молодого человека перспектив и четкое понимание на каждом из этапов его пребывания в Университете, в каких направлениях может идти его развитие.

Кроме возможностей профессионального роста и развития важное место в структуре профессиональной мотивации современного молодого поколения занимает вопрос материального обеспечения работников. И это вполне естественно, ведь молодые люди хотят заниматься такой деятельностью, которая позволит им наиболее полно удовлетворять имеющиеся потребности. Поэтому и на этапе принятия решения о целевом обучении, и в период трудовой деятельности важной является не только информация об уровне заработной платы, но и действующей системе материального стимулирования персонала, позволяющая поощрять тех работников, которые добились высоких индивидуальных результатов. Подтверждением того, что такая система в Университете есть и действует являются данные о средних выплатах работникам из числа ППС за 2019 год (рис. 6).

Реализация проекта целевой подготовки в интересах РТУ МИРЭА основывается на понимании того, что каждый человек имеет свои жизненные установки, карьерные устремления, представления о развитии своих профессиональных и личностных качеств.

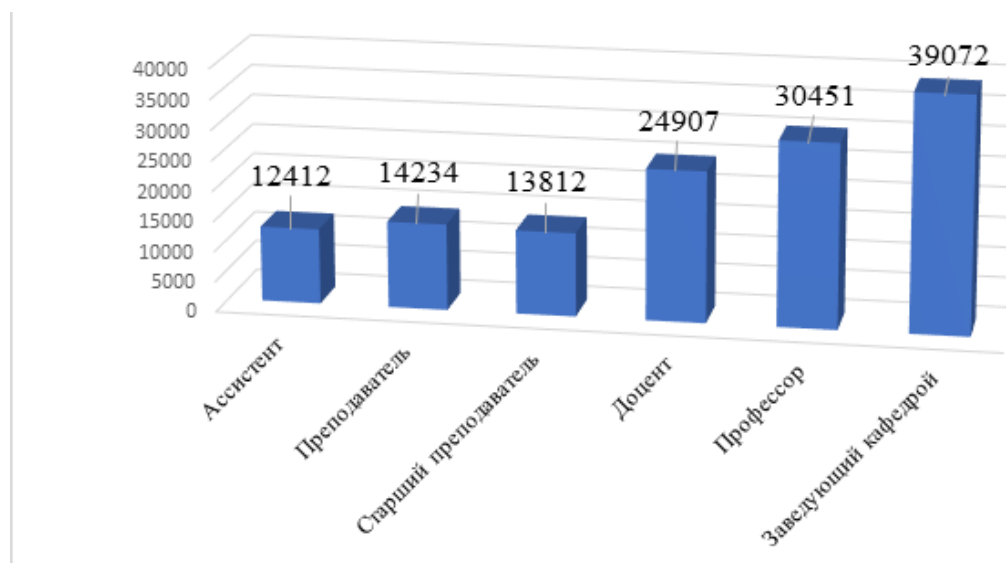


Рис. 6. Средние выплаты работнику из числа ППС через систему стимулирования деятельности РТУ МИРЭА в 2019 году (ежемесячно, руб).

Личность человека – это структура не просто личностных, а жизненных смыслов, которые чрезвычайно значимы для любого, и выстроить которые стремится каждый [13]. И от того, насколько Университет сможет создать условия для их реализации, зависит эффект целевой подготовки.

Заключение

Перед МИРЭА – Российским технологическим университетом в ближайшие 5 лет стоит задача не только выстроить целевую подготовку в интересах Университета, но и обеспечить молодые кадры интересной работой, выстроенной индивидуальной траекторией образования и профессионального развития, понятными условиями труда и быта, при этом предоставляя для действующего профессорско-преподавательского состава возможности продолжить работу в вузе в качестве профессоров-наставников, создавая научные школы для наиболее перспективных направлений развития науки и техники в университете.

Целевая подготовка как хорошо известный механизм обеспечения молодыми специалистами предприятий и организаций в современных условиях может успешно применяться и в сфере высшего образования, когда образовательная организация выступает заказчиком по подготовке кадров для себя.

Разработанный в РТУ МИРЭА подход к целевой подготовке позволяет формировать интерес к преподавательской и научно-исследовательской деятельности, начиная с этапа взаимодействия вуза с выпускниками школ, колледжей как будущими абитуриентами, и развивая этот интерес и вовлеченность в деятельность образовательной организации уже на этапе обучения, что в последующем обеспечивает закрепление молодых специалистов в вузе. Такой расширенный подход создает гарантированную систему обеспечения Университета кадрами требуемой квалификации и с определенным уровнем их вовлеченности как сотрудников Университета.

Для абитуриентов, рассматривающих возможность обучения по договору с РТУ МИРЭА, предлагаемый подход абсолютно прозрачен. Он позволяет увидеть уже на этапе принятия решения о заключении договора весь спектр возможностей, который имеется как на этапе обучения, так и на этапе последующей трудовой деятельности; понять, какими ресурсами располагает Университет и как они могут быть использованы для достижения личных жизненных целей.

Литература:

1. Рогова В.А. Кадровые проблемы развития высоких технологий в России в зеркале глобального индекса инноваций. *Российский технологический журнал*. 2018;6(4):105-116.
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-4-105-116>
2. Указ Президента Российской Федерации от 7 мая 2012 года № 597 «О мероприятиях по реализации государственной социальной политики». [Электронный ресурс]: режим доступа – свободный (дата обращения: 21.06.2020),
URL: <https://mintrud.gov.ru/docs/president/ukaz/37>
3. Указ Президента Российской Федерации от 7 мая 2012 года № 599 «О мерах по реализации государственной политики в области образования и науки». [Электронный ресурс]: режим доступа – свободный (дата обращения: 21.06.2020),
URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/35263>
4. Федеральный закон «Об образовании в Российской Федерации» от 29.12.2012 № 273-ФЗ (последняя редакция).
http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_140174/
5. Березуцкая Ю.П. Мотивационное программно-целевое обеспечение анализа управленческой деятельности руководителя образовательного учреждения: монография. Барнаул: Изд-во Алт. ИПК АПК, 2011. 160 с.
6. Дарвиш О.Б. Использование мотивационного программно-целевого подхода в профессиональной подготовке педагогов-психологов. *Мир науки, культуры, образования*. 2019;4(77):99-100.
7. Воронина Т.П. Философские проблемы образования в информационном обществе: автореф. дисс. ... докт. филос. наук: М., 1995. 41 с.
8. Шалаев И.К. Мотивационное программно-целевое управление в сфере образования: инновационный потенциал и его реализация. *Мир науки, культуры, образования*. 2012;1(32):149-153.
9. Профессиональная педагогика: Учебник для студентов, обучающихся по педагогическим специальностям и направлениям, под ред. С.Я. Батышева, А.М. Новикова. Изд. 3-е, переработанное. М.: Изд-во ЭГБЕС. 2009. 455 с.
10. Гершунский Б.С. Философия образования для XXI века: учебн. пособие для самообразования. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Пед. о-во России. 2002. 512 с. ISBN 5-93134-172-2
11. Ибрагимов Г.И. Актуальные методологические проблемы дидактики профессиональной школы. *Образование и наука*. 2014;(6):3-19.
<https://doi.org/10.17853/1994-5639-2014-6-3-19>
12. Леонтьев А.Н. Лекции по общей психологии: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Психология», под ред. Д.А. Леонтьева, Е.Е. Соколовой. Изд. 5-е, стер. М.: Смысл: Academia, 2010. 509 с. ISBN 978-5-89357-230-8
13. Бороздина Л.В. Проблемы характера и психологии. *Вопросы психологии*. 2012;1:36-43.
14. Dave R.H., Perera D.A., Ouane A. Learning Strategies for Post-literacy and Continuing Education: A Cross-national Perspective. 2. ed. Hamburg: UNESCO Inst, for educ., 1988. 311 p. ISBN: ISBN-92-820-1052-X
15. Kidd D.R., Robins Y. The Implications of Continuous Learning. Toronto: Gage, 1966. 158 p.
16. Dave R.H. Foundations of Lifelong Education. Paris: Pergamon Press, 1976. 328 p.
17. Lengrand P. An Introduction to Lifelong Education. London: Croom Helm; Paris: The UNESCO Press, 1975. 99 p.
18. Lengrand P. Areas of Lifelong Basic to Lifelong Education. Oxford-New York: Pergamon Press, 1986. 156 p.
19. Феофанов А.М. Студенты казеннокоштные. Императорский Московский университет: 1755–1917: энциклопедический словарь. М.: Российская политическая энциклопедия (РОССПЭН), 2010. С. 699–700. ISBN 978-5-8243-1429-8.
20. Постановление Центрального исполнительного комитета и Совета народных комиссаров СССР от 15.09.1933 «Об улучшении использования молодых специалистов».
<http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=ESU&n=4748#02833346685688123>
21. Путило Н.В. Целевой прием в вузы: история, вопросы и новые перспективы. *Ежегодник российского образовательного законодательства*. 2016;11:30-50.

22. Федеральный закон «О внесении изменений и дополнений в Закон Российской Федерации «Об образовании» и Федеральный закон «О высшем и послевузовском профессиональном образовании» от 25.06.2002 № 71-ФЗ (последняя редакция).

http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_37284/.

23. Федеральный закон «Об образовании в Российской Федерации». М.: Проспект, 2013. 160 с.

24. Постановление Правительства РФ от 21 марта 2019 г. № 302 «О целевом обучении по образовательным программам среднего профессионального и высшего образования и признании утратившим силу постановления Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2013 г. № 1076».

<https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72103006/>.

25. Аникин В.М., Пойзнер Б.Н., Соснин Э.А. Целевое обучение как целенаправленная система деятельности. *Высшее образование в России*. 2019;28(3):35-49.

References:

1. Rogova V.A. Problem of staffing for development of high technologies in Russia in the mirror of the global innovation index. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2018;6(4):105-116. (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-4-105-116>

2. *Ukaz Prezidenta Rossiiskoi Federatsii ot 7 maya 2012 goda № 597 «O meropriyatiyakh po realizatsii gosudarstvennoi sotsial'noi politiki»* (Decree of the President of the Russian Federation of May 7, 2012 No. 597 "On measures for the implementation of state social policy". [Electronic resource]: access mode - free (accessed date: 06/21/2020),

URL: <https://mintrud.gov.ru/docs/president/ukaz/37> (in Russ.).

3. *Ukaz Prezidenta Rossiiskoi Federatsii ot 7 maya 2012 goda № 599 «O merakh po realizatsii gosudarstvennoi politiki v oblasti obrazovaniya i nauki»* (Decree of the President of the Russian Federation of May 7, 2012 No. 599 "On measures to implement the state policy in the field of education and science". [Electronic resource]: access mode - free (access date: 06/21/2020),

URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/35263> (in Russ.).

4. *Federal'nyi zakon «Ob obrazovanii v Rossiiskoi Federatsii» ot 29.12.2012 № 273-FZ (poslednyaya redaktsiya)*. (Federal Law "On Education in the Russian Federation" dated December 29, 2012 No. 273-ФЗ (latest revision). http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_140174/ (in Russ.).

5. Berezutskaya Yu.P. *Motivatsionnoe programmno-tselevoe obespechenie analiza upravlenche-skoi deyatel'nosti rukovoditelya obrazovatel'nogo uchrezhdeniya: monografiya* (Motivational target software analysis of managerial activities of the head of an educational institution: a monograph). Barnaul: Publishing house Alt. MPK APK; 2011. 160 p. (in Russ.).

6. Darvish O.B. The use of motivational program-target approach in professional training of teachers-psychologists. *Mir nauki, kul'tury, obrazovaniya = The world of science, culture, education*. 2019;4(77):99-100 (in Russ.).

7. Voronina T.P. Philosophical problems of education in the information society: Dr. of Sci. (Philosophy) thesis. Moscow, 1995. 41 p. (in Russ.).

8. Shalaev I.K. The motivatsional-programmatic-aimed management in the sphere of education: innovative potential and its realization. *Mir nauki, kul'tury, obrazovaniya = The world of science, culture, education*. 2012;1(32):149-153 (in Russ.).

9. Batysheva S.Ya., Novikov A.M. (Eds.). *Professional'naya pedagogika: Uchebnik dlya studentov, obuchayushchikhsya po pedagogicheskim spetsial'nostyam i napravleniyam* (Professional pedagogy: A textbook for students enrolled in pedagogical majors and areas). Moscow: Izd-vo EGVES. 2009. 455 p. (in Russ.).

10. Gershunskii B.S. *Filosofiya obrazovaniya dlya XXI veka: uchebnoe posobie dlya samoobrazovaniya* (Philosophy of education for the 21st century: textbook allowance for self-education). Moscow: Pedagogicheskoe obshchestvo Rossii; 2012. 512 p. (in Russ.). ISBN 5-93134-172-2

11. Ibragimov G.I. Methodological problems of higher school didactics. *Obrazovanie i nauka = The Education and science journal*. 2014;(6):3-19. (in Russ.) <https://doi.org/10.17853/1994-5639-2014-6-3-19>

12. Leont'ev A.N. *Leksii po obshchei psikhologii: uchebnoe posobie dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedenii, obuchayushchikhsya po spetsial'nosti «Psikhologiya», pod red. D.A. Leont'eva, E.E. Sokolovoi* (Lectures on general psychology: a textbook for students of higher educational institutions studying in the specialty "Psychology", D.A. Leont'eva, E.E. Sokolovoi (Eds.). Moscow: Smysl: Academia; 2010. 509 p. (in Russ.). ISBN 978-5-89357-230-8

13. Borozdina L.V. The problem of character in psychology. *Voprosy psikhologii*. 2012;1:36-43 (in Russ.).

14. Dave R.H., Perera D.A., Ouane A. Learning Strategies for Post-literacy and Continuing Education: A Cross-national Perspective. 2. ed. Hamburg: UNESCO Inst, for educ.; 1988. 311 p. ISBN: ISBN-92-820-1052-X

15. Kidd D.R., Robins Y. The Implications of Continuous Learning. Toronto: Gage; 1966. 158 p.

16. Dave R.H. Foundations of Lifelong Education. Paris: Pergamon Press; 1976. 328 p.

17. Lengrand P. An Introduction to Lifelong Education. London: Croom Helm; Paris: The UNESCO Press; 1975. 99 p.

18. Lengrand P. Areas of Lifelong Basic to Lifelong Education. Oxford-New York: Pergamon Press; 1986. 156 p.
19. Feofanov A.M. *Studenty kazennokoshnyye. Imperatorskii Moskovskii universitet: 1755–1917: entsiklopedicheskii slovar'* (State-owned students. In: Imperial Moscow University: 1755–1917: Encyclopedic Dictionary). Moscow: Rossiiskaya politicheskaya entsiklopediya (ROSSPEN); 2010. P. 699–700 (in Russ.). ISBN 978-5-8243-1429-8.
20. *Postanovlenie Tsentral'nogo ispolnitel'nogo komiteta SSSR, Sovet narodnykh komissarov SSSR ot 15.09.1933 «Ob uluchsheniі ispol'zovaniya molodykh spetsialistov»* (Resolution of the Central Executive Committee and the Council of People's Commissars of the USSR of September 15, 1933, "On improving the use of young specialists"). <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=ESU&n=4748#02833346685688123>.
21. Putilo N.V. Target enrollment in high school: history questions and new perspectives. *Ezhegodnik rossiiskogo obrazovatel'nogo zakonodatel'stva*. 2016;11:30–50 (in Russ.).
22. *Federal'nyi zakon "O vnesenii izmenenii i dopolnenii v Zakon Rossiiskoi Federatsii "Ob obrazovanii" i Federal'nyi zakon "O vysshem i poslevuzovskom professional'nom obrazovanii" ot 25.06.2002 № 71-FZ (poslednyaya redaktsiya)*. (Federal Law "On Amendments and Additions to the Law of the Russian Federation" On Education "and the Federal Law" On Higher and Postgraduate Professional Education "dated 06.06.2002 N 71-ФЗ (latest revision). http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_37284/.
23. *Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 21 marta 2019 g. № 302 «O tselevom obuchenii po obrazovatel'nyim programmam srednego professional'nogo i vysshego obrazovaniya i priznanii utrativshim silu postanovleniya Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 27 noyabrya 2013 g. № 1076»* (Decree of the Government of the Russian Federation dated March 21, 2019 No. 302 «On targeted training in educational programs of secondary vocational and higher education and recognition as invalid the decree of the Government of the Russian Federation dated November 27, 2013 № 1076»). <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72103006/>
24. Anikin V.M., Poizner B.N., Sosnin E.A. The contract education as a goal-oriented system of activity. *Vysshee obrazovanie v Rossii = Higher Education in Russia*. 2019;28(3):35–49 (in Russ.).

Об авторах:

Кудж Станислав Алексеевич, доктор технических наук, профессор, ректор ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: rector@mirea.ru. Scopus Author ID 56521711400, <http://orcid.org/0000-0003-1407-2788>

Голованова Наталия Борисовна, доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры экономики и инновационного предпринимательства Института экономики и права, заместитель первого проректора ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: golovanova@mirea.ru. Scopus Author ID 57191447039, <http://orcid.org/0000-0003-4249-7126>

About the authors:

Stanislav A. Kudzh, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Rector of the MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). E-mail: rector@mirea.ru. Scopus Author ID 56521711400, <http://orcid.org/0000-0003-1407-2788>

Nataliya B. Golovanova, Dr. Sci. (Economics), Professor, Professor of the Department of Economics and Innovative Entrepreneurship, Institute of Economics and Law, Deputy First Vice Rector, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). E-mail: golovanova@mirea.ru. Scopus Author ID 57191447039, <http://orcid.org/0000-0003-4249-7126>

Поступила: 15.05.2020; Получена после доработки: 26.05.2020; Принята к опубликованию: 25.06.2020.

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-4-129-140>



УДК 378.14; 504; 621.3:331.4

Структуризация дисциплин «Инженерная экология» и «Безопасность жизнедеятельности» как средство повышения качества их усвоения

В.М. Михайлов

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

@Автор для переписки, e-mail: mihajlov@mirea.ru

Статья посвящена особенностям организации преподавания дисциплин общей подготовки («Инженерная экология», «Безопасность жизнедеятельности» и др.) при отсутствии полноценной практики. В таких случаях предлагается обучение выстраивать на основе учета структурных свойств учебного материала как в лекциях, так и в заданиях для самостоятельной работы. Связано это с тем, что наш внутренний когнитивный процесс выстроен системно и на начальном (незавершенном) этапе обучения способен обеспечивать восприятие лишь структурно представляемых закономерностей. Существующее множество нюансов их параметрического насыщения, которые «укладываются» в общую канву изучаемого материала лишь при его детальном рассмотрении, без соответствующей практики усвоить достаточно сложно. Преодоление данного затруднения связано с постоянным присутствием в транслируемом материале четко выраженной структурно-логической основы. Это относится как к изучению теории, так и к формированию заданий (например, тем рефератов) с обязательным отражением в последнем выявленной структурной схемы в использованном материале. Показаны системные закономерности формирования индивидуального восприятия при его освоении и стадий формирования представлений. Рассматриваются примеры структурных схем, используемых при подаче учебного материала, наглядно упрощающие его восприятие и повышающие уровень усвоения, например, по закономерностям организации и функционирования экосистем, по схемам электроснабжения и защиты помещений с системой TN-S с однофазным и трехфазным вводами.

Ключевые слова: структурно-логическая основа учебного материала, системность когнитивных процессов, структурность восприятия учебного материала, структурная устойчивость экосистем, структурная основа безопасности электросетей.

Для цитирования: Михайлов В.М. Структуризация дисциплин «Инженерная экология» и «Безопасность жизнедеятельности» как средство повышения качества их усвоения. *Российский технологический журнал*. 2020;8(4):129-140. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-4-129-140>

Structuring of the disciplines «Engineering ecology» and «Safety of the Life» as a means of improving the quality of their learning

Valery M. Mikhailov

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia
@Corresponding author, e-mail: mihajlov@mirea.ru

The article is devoted to the peculiarities of organizing the teaching of general training disciplines ("Engineering Ecology," "Safety of the Life" etc.) in the absence of full practice. In such cases, it is proposed to build training on the basis of accounting for the structural properties of the educational material in both lectures and self-work assignments. This is due to the fact that our internal cognitive process is built systemically and at the initial (unfinished) stage of learning is able to provide perception only of structurally represented patterns. A huge set of nuances of their parametric saturation, which "stacked" in the general canvas of the studied material only at its detailed examination, without appropriate practice to assimilate quite difficult. Overcoming this difficulty is associated with the constant presence in the broadcast material of a clearly expressed structural and logical basis. This applies both to the study of theory, and to the formation of tasks (e.g., abstract topics) with obligatory reflection in the last identified structural scheme in the material used. The systemic patterns of the formation of individual perception in its development and stages of formation of representations are shown. Examples of structural schemes used in the presentation of educational material are presented, clearly simplifying its perception and increasing the level of assimilation, for example, by the regularities of the organization and functioning of ecosystems, on the schemes of electricity supply and protection of premises with a system of TN-S with single-phase and three-phase inputs. This approach also allows us to visualize the patterns of coordination between the characteristics of electrically protective devices.

Keywords: structurally-logical framework training material, systematic cognitive processes, structuring of perception training material, structural stability of ecosystems, structural foundation security networks.

For citation: Mikhailov V.M. Structuring of the disciplines «Engineering ecology» and «Safety of the Life» as a means of improving the quality of their learning. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = *Russian Technological Journal*. 2020;8(4):129-140 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-4-129-140>

Введение

Преподавание дисциплин общей подготовки таких, как «Инженерная экология», «Безопасность жизнедеятельности» (БЖД) и других при отсутствии полноценной практики настоятельно требует поиска дополнительных возможностей обеспечения необходимого уровня их освоения.

Объясняется это необходимостью освещать сложные системные процессы функционирования экосистем, их внутренних взаимосвязей и сбалансированности (рис. 1), формирующие условия сохранения устойчивости биосферы при внешних природно-антропогенных воздействиях. Также не менее сложными для понимания являются вопросы обеспечения нормативной эксплуатации и безопасности электроустановок при необходимости учета и согласования как многочисленных характеристик используемых устройств, так и широкого спектра возможных последствий в случае нарушений условий их согласованности.

Принципы и подходы к структуризации дисциплин

I. Закономерности функционирования экосистем определяются *абиотическими* и *биотическими* свойствами компонентов природы. Последним и принадлежит главная роль в аккумуляции энергии в экосистемах и создании органических веществ. Аккумуляторами являются в основном растительные организмы – *продуценты* или *автотрофы* («являющиеся пищей»). В качестве исходного материала они используют простые неорганические вещества: воду, CO_2 , нитраты и фосфаты. В качестве энергетического материала – солнечный свет либо энергию химических реакций, т.е. подразделяются на фото- и хемоавтотрофы.

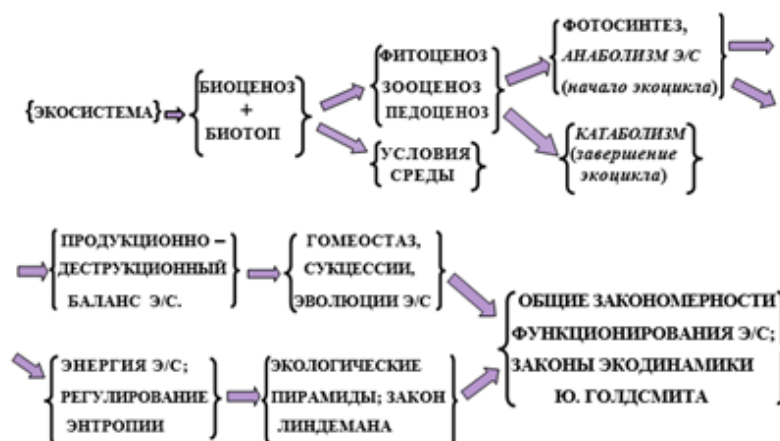


Рис. 1. Структурная схема стадий формирования представлений о закономерностях организации и функционирования экосистем.

Главная роль в этом принадлежит фитоценозам, т.е. растениям. Поглотителями вырабатываемой пищи являются многочисленные виды гетеротрофов. Дальнейшие этапы становления экосистем происходят за счет движения потоков вещества и энергии по трофическим цепям (структурам) со своими специфическими особенностями. Их проявление связано с колебаниями продукционно-деструкционного баланса, с формированием гомеостаза (устойчивости) или соответствующих сукцессий и обратимых изменений при

устойчивой (сохраняемой) структуре экосистем, либо эволюций, уже при необратимых (например, при разрушающих структуру воздействиях) изменениях [1].

И все нюансы данных этапов жизненного цикла экосистем на основе законов экодинамики приводят в итоге к созданию глобальной среды обитания – биосферы. Основу ее существования и обеспечение устойчивости составляет комплекс взаимосвязанных *структурированных и автоматизированных* процессов, которые в таком же системном качестве и должны восприниматься аудиторией [2–5].

II. Аналогичные вопросы возникают и при изучении одного из важнейших разделов дисциплины «Безопасность жизнедеятельности» – электробезопасности. Структурные особенности основных систем электрозащиты определяют возможности их применения. Главные различия заключаются в том, что при *защитном заземлении* в электроустановках до 1 кВ полностью отсутствуют технические средства активного контроля аварийной ситуации, а при *защитном занулении* под контролем автоматических выключателей остаются лишь сверхтоки. Таким образом, токи утечки менее номинального (I_n) также остаются бесконтрольными, а опасности возгораний, травм, ущерба имуществу, а также угрозы жизни людей в целом сохраняются. Для преодоления данных недостатков в обоих случаях требуются дополнительные средства защиты. И наиболее совершенной защитой в электроустановках до 1кВ стал способ *защитного отключения* уже с полным контролем всего диапазона изменений значений силы тока от $6 \div 10$ мА до 10 кА.

В подобной ситуации общим условием успешности освоения учебного материала является обеспечение результативного целостного восприятия основных особенностей изучаемых процессов и их типов на основе структурной оценки (иерархии) влияния *определяющих факторов*. Обозначенное комплексное условие неслучайно, поскольку только лишь при четко представляемых приоритетах влияния и последовательности их действия в изучаемых процессах появляется возможность обеспечить результативное восприятие изучаемого материала и применение полученных знаний, будь то для выполнения курсовых заданий по экологии или обоснования выбора и координации электрозащитных устройств в электроустановке.

III. Отмеченные требования подачи учебного материала должны учитывать также и *специфику системного функционирования внутреннего познавательного процесса у обучающихся*. Поэтому особую актуальность приобретает согласование состава учебного материала, особенностей его подачи с обязательным выстраиванием обратной связи, осуществляемой в виде индивидуальных проработок и их оценок.

Значение подобного согласования заключается в обеспечении эффективного формирования внутреннего индивидуального восприятия изучаемого материала. Объясняется это тем, что когнитивный процесс является системным. Использование структурно неподготовленного материала или материала без встроенного контроля усвоения значительно снижает качество изучения, поскольку при этом разрывается функциональная целостность сформированных представлений.

Поэтому качество *исходного* учебного материала, транслируемого в аудитории и степень его усвоения являются *важнейшими вопросами обеспечения эффективности обучения*. Основные затруднения связаны прежде всего с недостаточной *логической структурированностью* исходного материала и трудностями полноценного учета особенностей функционирования *внутренних познавательных процессов* слушателей. В первом случае

должно обеспечиваться структурно-логическое построение учебного курса, включая как его общую компоновку и последовательность рассмотрения разделов, так и структуризацию их содержания и в теории, и в практической части. Причина *второго* затруднения заключается в том, что представления о внутренних особенностях нашего познания определяются известной в психологии, но при этом достаточно *свернутой* и *одноуровневой* (плоской) схемой их осуществления в следующей последовательности [6]:

Ощущение → Восприятие → Память → Представление (Воображение) → Мышление.

При этом недостаточно учитывается *мера включения* и *роль каждого* из процессов и их составляющих при усвоении изучаемого материала в целом, а также специфика их взаимосвязи на уровне предметного проявления. В то же время, сбой функционирования какого-либо из них, как и в любом последовательном процессе лимитирует в той же степени и конечный результат обучения.

Преобладающая изолированность проявления внутренних когнитивных процессов и наличие в учебном материале свернутых положений (по умолчанию) является основной причиной потери какой-то части исходной информации для принятия решений и целостности в восприятии изучаемого процесса. Это особенно проявляется, например, при анализе условий выполняемых заданий, в которых обязательно отсутствует в явном виде какая-то часть, что становится непреодолимым когнитивным препятствием, снижающим общую результативность учебной деятельности.

IV. Известно, что из всех перечисленных процессов лишь процесс *восприятия* на основе первичных *ощущений* отдельных свойств изучаемого объекта позволяет слушателю сформировать его собственный внутренний образ. И от того, насколько они соответствуют друг другу, определяется потенциал итогового результата обучения. В целом организацию и взаимодействие внутренних познавательных процессов человека можно представить в следующем виде (рис. 2) [6].



Рис. 2. Схема организации и взаимодействия внутренних познавательных процессов [6].

Сформированный *восприятием* целостный (структурный) образ объекта трансформируется в соответствующее *представление*, контролируется *мышлением* и заносится в *память*. Далее это позволяет формировать новый уровень *ощущений* уже более глубокого содержания. Речь идет о заложенной в данную схему возможности обеспечения цикличности, непрерывности сбалансированности процесса обучения, а *восприятие* по

своей функциональной сущности является *основной информационного обеспечения* всего познавательного процесса [6].

Кроме этого, при освоении учебного материала также необходим учет стадий формирования восприятия в аудитории, которые имеют 4 последовательных шага (рис. 3). Игнорирование какого-либо из них не позволит достичь требуемого уровня его освоения [7]. Поэтому *восприятие* учебного материала и его уровень (в предметном определении) можно сформулировать следующим образом.

Восприятие учебного материала – это понимание и способность обучаемого *определять*:

- а) *тематическую принадлежность рассматриваемого материала, его структуру и параметры*;
- б) *вид (тип) заданий и возможности применения теории*;
- в) *состав и последовательность необходимых действий по их выполнению* [6].



Рис. 3. Стадии формирования восприятия учебного материала [6].

Известно, что качество формирующихся знаний зависит от многих факторов и при этом значительно дифференцируется в аудитории. Поэтому помимо качества исходного материала и его трансляции, необходимо обеспечить функционирование механизма обратной связи с оценкой не только того, что *воспринимается*, но и *уровня восприятия*. Последнее относится как к изучению теории, так и к её использованию. В тех случаях, когда изучение теории закрепляется выполнением практических заданий, схему усвоения материала можно представить в следующем виде (рис. 4).

В тех случаях, когда организация полноценных и, главное, репрезентативных практических занятий невозможна, формирование восприятия учебного материала, необходи-

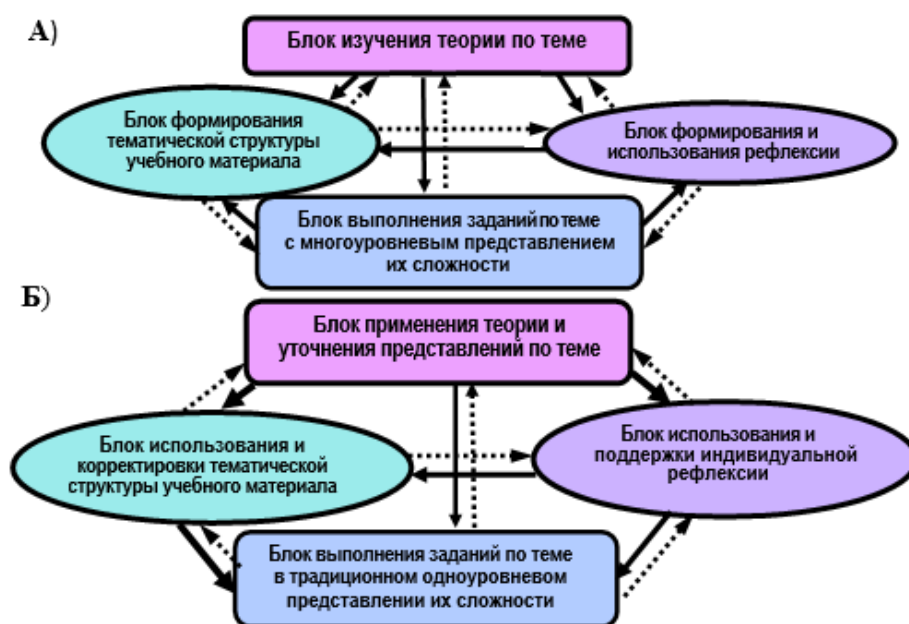


Рис. 4. Схемы обучающего (А) и закрепляющего (Б) этапов при работе с практическим материалом (сплошные линии – основные информационные потоки, пунктирные линии – вспомогательные информационные потоки) [6].

мое для выполнения различных заданий, следует основывать на принципе обязательной достаточности структурного обоснования и соответствующего раскрытия содержания всех задействованных стадий рассматриваемых процессов.

V. Сказанному выше соответствует приведенный пример учета стадий формирования представлений о закономерностях функционирования экосистем при анализе их функциональности (рис. 1). Это позволяет оценить все действующие факторы и приоритеты их проявления в анализируемом комплексе условий среды, а также все виды, и количество задействованных при этом организмов, и вещественно-энергетическое обеспечение происходящих процессов.

При подобном подходе и соответствующем системном анализе удастся выявлять не только всю картину происходящего, но и ориентироваться в случае неблагоприятных воздействий в причинах возникновения напряжений и кризисных явлений, как в отдельных экосистемах, так и в экологической среде в целом.

Объясняется это тем, что становится очевидным выявление адреса, характера и степени отрицательного воздействия на факторы, обеспечивающие устойчивость функционирования экосистем. И если при этом уровень угнетенности от действия вредного фактора не превышает критического значения, то после его прекращения изменение состояния биоценоза будет обратимым и экосистема сможет восстановиться. Но при превышении этого уровня, которое является разрушительным для структуры экосистемы, изменение её состояния будет уже необратимым и, как правило, деградирующим.

Подобные неблагоприятные эффекты вплоть до их крайне опасных проявлений и касающихся каждого из нас в повседневной практике в рабочей и бытовой обстановке, могут происходить также и в используемых электросетях. Причины этого связаны с недостаточным учетом и согласованием требований по безопасности на всех структур-

ных уровнях организации электроустановок, а также при ошибочной оценке качества и, соответственно, необоснованном выборе защитного оборудования и значений их индивидуальных характеристик. Последнее стало возможным в связи с расширением нормативного допуска к эксплуатации электрозащитных устройств ограниченного применения на общих основаниях [7]. Кроме этого для исключения нарушений эксплуатации электрозащитного оборудования должно быть обеспечено согласование состава электрозащитных устройств и координация их характеристик. На практике это способствует значительному увеличению количества аварий в электросетях, что сопровождается более чем порядковым ростом в том числе и массовых человеческих жертв, а также и размеров материальных ущербов.

Проиллюстрировать необходимость учета основополагающих положений обеспечения электробезопасности можно на примере представления в аудитории наиболее распространенной системы *защитного отключения* (в сетях до 1 кВ) с особенностями выбора параметров защитных устройств электроустановки и правилами их координации в этом случае.

В данной системе сочетание автоматических выключателей (АВ) и устройств защитного отключения (УЗО) составляет эффективную основу способа защиты электросетей с напряжением до 1 кВ. В общем случае электроустановка защищается одним или несколькими устройствами автоматического отключения в случае появления как сверхтоков (перегрузки, короткие замыкания), так и недопустимых (по величине и продолжительности прохождения) сравнительно малых токов утечки. *Защитное отключение* в обязательном порядке обеспечивается присутствием заземления на каждом объекте электроустановки – с добавлением РЕ-проводника, т.е. 3-го провода в однофазном случае и 5-го в трехфазном случае (рис. 5, 6).

Как уже отмечалось, устройства защиты выбираются с учетом параметров потребляемой энергии, ожидаемых токов короткого замыкания (КЗ), характеристик нагрузки и особенностей проводной сети.

Нормами ГОСТ Р 50571.5.53–2013 (на основе международного стандарта МЭК 364-5-53) определены общие требования к низковольтным устройствам, в том числе к выбору и монтажу аппаратов защиты от сверхтоков (АВ) и УЗО, а также координации их индивидуальных параметров.

Перечень требований к параметрам защиты хотя и достаточно внушителен, но при их структурировании на основе учета особенностей функционирования электроустановок и требований их приоритетов, понимание становится вполне достижимым. Для этого в пределах учебного курса достаточно более подробно остановиться на структурных аспектах обоснования выбора и параметров устройств электрозащиты и их координации в бытовых и рабочих условиях. Они заключаются в следующем:

- прежде всего, рассчитывается защита от *сверхтока* с помощью АВ. В зависимости от рассчитанной нагрузки и типа сети (одно- или трехфазной) определяются следующие параметры устройства. Это номинальное напряжение ($U_n = 220$ В и 380 В) и токи нагрузки ($I_n = 6, 10, 16, 25, 40, 63, 80, 100, 125$ А и др.) на всех группах и уровнях сети [5, 7].

- далее определяются уровни возможного значения возникающих в цепи КЗ и их гарантированное отключение. В соответствии с этим осуществляется выбор отключающей способности ($I_{сп}$) до 10000 А, до 6000 А, до 4500 А, до 3000 А. По данным международной

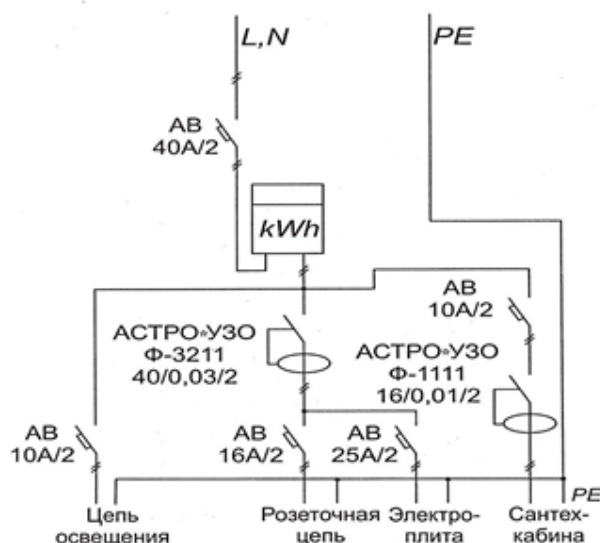


Рис. 5. Схема электроснабжения и защиты квартиры с системой TN-S (нулевой защитный и нулевой рабочий проводники полностью разделены).

и отечественной практики предпочтительны два первых уровня – устройства со значениями $I_{\text{сп}} = 4500 \text{ А}$ и 3000 А следует использовать лишь на отдельных потребителях с небольшой нагрузкой.

– следующая характеристика автоматических выключателей связана с их распределением в электроустановке на основе учета их возможностей по токам мгновенного отключения с кратностью отключаемых сверхтоков от $(3-5) I_n$ (тип В), $(5-10) I_n$ (тип С), $(10-20) I_n$ (тип D). На потребителях 1-го уровня для контроля и защиты отдельных электрических цепей используются автоматы типа В. При усложнении электроустановки (уже на группах отдельных цепей) следует использовать тип С, а при дальнейшем усложнении электросети наступает необходимость установки автоматов типа D [8, 9].

– далее учитывается показатель **токоограничения** автоматических выключателей (АВ), определяющий количество энергии, которую устройство пропускает через себя без вреда до момента отключения тока короткого замыкания (КЗ). По показателю токоограничения наиболее совершенные автоматические выключатели относятся к 3 классу, что означает минимум 3-кратное ограничение энергии КЗ, попадающее в цепь до его отключения по сравнению с обычными устройствами. Это, соответственно, уменьшает тепловые и ударные нагрузки на электроустановку, поскольку возникающая дуга гасится в этом случае за полпериода промышленной частоты, что почти в 10 раз быстрее, чем у АВ без токоограничения.

В итоге, например, АВ с номинальной отключающей способностью до 6000 А и 3-м классом ограничения энергии КЗ маркируются соответствующим знаком . Кроме этого на панели указываются номинальные значения напряжения и силы тока, а также тип автомата (В, С или D).

VI. Координация УЗО с автоматическим выключателем осуществляется на следующих принципах.

1. Значение номинального напряжения УЗО (U_n) равно номинальному напряжению АВ. Номинальный ток (I_n) УЗО для его защиты от некрatных перегрузок (до 50%) вы-

бирается на одну ступень (по шкале номинальных токов) выше. Например, если I_n для АВ равен 10 А, то для УЗО он должен быть 16 А (в цепи сантехники), а при I_n для АВ до 25 А в остальных цепях УЗО берется с $I_n = 40$ А. Аналогичная ситуация и в случае более сложного варианта координации защитных устройств в электроустановке с трехфазным вводом (рис. 6). Одна деталь – вводной автомат (АВ) имеет тот же номинальный ток, что и УЗО, но в данном случае защиту устройства осуществляют автоматические выключатели цепей 1-го порядка с I_n от 6 до 16 А на первых двух фазных ($L1$ и $L2$) проводниках и 32 А на третьем ($L3$).

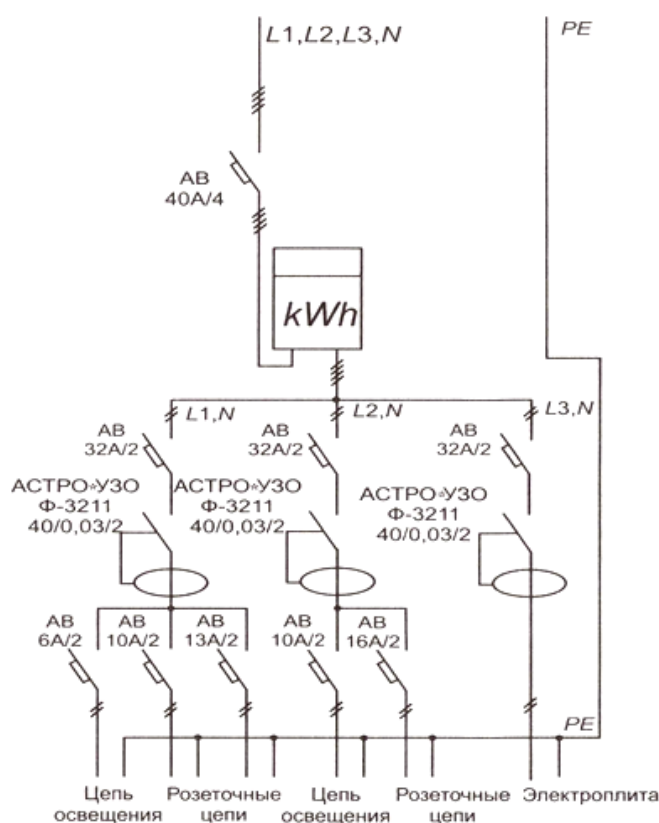


Рис. 6. Схема электроснабжения и защиты помещения с системой TN-S и трехфазным вводом.

2. Должна быть определена уставка УЗО на основе расчета уровня тока утечки в цепи (сети).

Номинальный отключающий дифференциальный ток УЗО (уставка) $I_{\Delta n}$ должен не менее чем в три раза превышать суммарный ток утечки защищаемой цепи электроустановки – I_{Δ} :

$$I_{\Delta n} \geq 3I_{\Delta}.$$

Суммарный ток утечки электроустановки замеряется специальными приборами, либо определяется расчетным путем. При отсутствии фактических (замеренных) значений тока утечки в электроустановке ПУЭ (п. 7.1.83) предписывают принимать ток утечки электроприемников из расчета – 0,4 мА на 1 А тока нагрузки, а ток утечки цепи из расчета – 10 мкА на 1 м длины линейного проводника.

В практике выбора токовых уставок также следует учитывать специфику и сложность электроустановок. Для этого принята шкала со значениями 6, 10, 30, 100, 300, 500 мА. В случае повышенных требований по электробезопасности применяют УЗО с уставками, начиная с 6 мА и 10 мА (повышенная влажность, ионизированная среда и т.д.), а при их отсутствии с 30 мА (для отдельных потребителей) и выше (для групповых потребителей).

Кроме этого при радиальных (многоуровневых) схемах электроснабжения необходимо обеспечивать и селективность (структурность) их работы, чтобы избежать ложных срабатываний на тех ступенях защиты, где нарушений нет. Это достигается применением так называемых селективных УЗО с задержкой срабатывания, что дает возможность проинформировать отключение лишь на поврежденных участках сложных электросетей.

3. Номинальная включающая и отключающая (коммутационная) способность ($I_m = 500$ А или 1500 А) устройства выбирается с учетом сложности электроустановки и возможного уровня утечки при коротком замыкании на землю (КЗ внутри цепи контролируются автоматическими выключателями). Для более сложных (групповых) сетей предпочтительны устройства с $I_m = 1500$ А.

4. Условный ток короткого замыкания I_{nc} для УЗО должен быть со значением не ниже отключающей способности автоматического выключателя $I_{сп}$. Поскольку величина отключающей способности АВ нормируется (рассчитывается), то большие значения условного тока КЗ для УЗО допускаются. Например, при $I_{сп} = 6000$ А возможна установка УЗО как с $I_{nc} = 6$ кА, так и с $I_{nc} = 10$ кА.

Заключение

В заключении следует отметить, что предлагаемый структурно-логический подход изучения предметов с отсутствием полноценных практик на примере курсов «Инженерная экология» и «Безопасность жизнедеятельности» показал достаточную высокую эффективность. Так, на полноценное выполнение любого задания было достаточно 1–2 итераций для осознания студентом всей сути работы и приведение его в надлежащий вид. При рассмотрении вопросов электробезопасности обеспечивалось понимание аудитории сущности выстраивания эффективной защиты электросетей. Подобные результаты наблюдались и при изучении курса «Радиотехнические системы», в основу которого был взят аналогичный структурно-логический принцип обучения [10], ускоряющий усвоение учебного материала. В пользу предлагаемого подхода говорят также многочисленные примеры самостоятельной оценки студентами качества электрозащитных устройств на рабочих местах, в домашних электроустановках и их корректировки.

Литература:

1. Цветкова Л.И., Алексеев М.И., Кармазинов Ф.В. и [и др.] Экология: учеб. для вузов; под ред. Л.И. Цветковой. М.: Изд-во АСВ; СПб.: Химиздат, 2001. 552 с. ISBN 5-93093-096-1.
2. Столяренко Л.Д. Основы психологии. Издание 3-е, переработанное и дополненное. Серия «Учебники, учебные пособия». Ростов-на-Дону: «Феникс», 2000. 672 с.
3. Марфенин Н.Н. Устойчивое развитие человечества. Серия: Классический университетский учебник. М.: Изд-во МГУ, 2006. 624 с. ISBN 5-211-05059-2.
4. Тимофеев-Ресовский Н.В. Структурные уровни биологических структур. В кн.: Системный подход в экологии. Системные исследования АН СССР. Институт истории естествознания и техники. М., 1970. С. 80-136.

5. Михайлов В.М. О необходимости и методических возможностях обеспечения результативности восприятия учебного материала. *Вестник Вятского государственного гуманитарного университета*. 2014;11:222-233.
6. Михайлов В.М., Путилина Н.В. Восприятие учебного материала как основа информационного обеспечения образовательного процесса. *Вестник Московского университета. Сер. 20. Педагогическое образование*. 2015;3:114-127.
7. Монаков В.К., Кудрявцев Д.Ю. *Электробезопасность: Теория и практика*. М.: Инфра-Инженерия, 2017. 184 с. ISBN 978-5-9729-0188-3
8. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Раздел 7. Электрооборудование специальных установок. Глава 7.1. Электроустановки жилых, общественных, административных и бытовых зданий. 2017. 500 с. <http://pue7.ru/pue7/7.1.php>.
9. Аванесов В.М., Ерохин С.В. *Основы электробезопасности в организациях и на предприятиях*. Издание 4-е, переработанное и дополненное. М.: МИЭЭ, 2019. 180 с.
10. Маслина Л.Я., Балагур А.А., Волков С.И. *Радиотехнические системы: невербальное логически структурированное учебное пособие*. М.: МИРЭА, 2010. 79 с. ISBN 978-5-7339-0811-3

References

1. Tsvetkova L.I., Alekseev M.I., Karmazinov F.V., et al. *Ekologiya: ucheb. dlya vuzov* (Ecology: a textbook for universities); L.I. Tsvetkova (Ed.). Moscow: ACB Publishing House, SPb.: Khimizdat, 2001. 552 p. ISBN 5-93093-096-1. (in Russ.).
2. Stolyarenko L.D. *Osnovy psikhologii. Izdanie 3-e, pererabotannoe i dopolnennoe. Seriya «Uchebniki, uchebnye posobiya»* (Basics psychology. Third Edition). Rostov-na-Donu: «Feniks»; 2000. 672 p. (in Russ.).
3. Marfenin N.N. *Ustoichivoe razvitie chelovechestva. Seriya: Klassicheskii universitetskii uchebnik* (Sustainable development of Humanity. Series: Classical University Textbook). Moscow: Publishing House of Moscow State University; 2006. 624 p. (in Russ.). ISBN 5-211-05059-2
4. Timofeev-Resovskii N.V. Structural levels of biological structures. In: *Systematic Approach in Ecology. Systemic research of the USSR Academy of Sciences. Institute of the History of Natural Science and Technology*. Moscow; 1970. P. 80-136 (in Russ.).
5. Mikhailov V.M. On the need to provide opportunities and teaching effectiveness of perception educational material. *Vestnik Vyatskogo gosudarstvennogo gumanitarnogo universiteta = Herald of Vyatka State Humanitarian University*. 2014;11:222-233 (in Russ.).
6. Mikhailov V. M., Putilina N.V Teaching material perception as the basis of the information support in the educational process. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 20. Pedagogicheskoe obrazovanie = The Moscow University Bulletin. Series 20. Pedagogical Education*. 2015;3:114-127 (in Russ.).
7. Monakov V.K., Kudryavtsev D.Yu. *Elektrobezopasnost': Teoriya i praktika* (Electrical Safety: Theory and Practice). Moscow: Infra-Inzheneriya; 2017. 184 p. ISBN 978-5-9729-0188-3 (in Russ.).
8. *Pravila ustroystva elektroustanovok (PUE). Razdel 7. Elektrooborudovanie spetsial'nykh ustanovok. Glava 7.1. Elektroustanovki zhilykh, obshchestvennykh, administrativnykh i bytovykh zdaniy* (Rules for the installation of electrical installations (PUE). Section 7. Special electrical equipment installations. Chapter 7.1. Electrical installations for residential, public, administrative and domestic building). 2017. 500 p. <http://pue7.ru/pue7/7.1.php>.
9. Avanesov V.M., Erokhin S.V. *Osnovy elektrobezopasnosti v organizatsiyakh i na predpriyatiyakh* (The basics of electrical safety in organizations and enterprises)/ 4th ed. Moscow: MIEE Publishing House; 2019. 180 p. (in Russ.).
10. Maslina L.Ya, Balagur A.A., Volkov S.I. *Radiotekhnicheskie sistemy: neverbal'noe logicheskii strukturirovannoe uchebnoe posobie* (Radio systems: non-verbal a logically structured tutorial. Moscow: MIREA Publishing House; 2010. 79 p. ISBN 978-5-7339-0811-3.

Об авторе:

Михайлов Валерий Михайлович, кандидат географических наук, доцент кафедры инженерной экологии техносферы Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the author:

Valery M. Mikhailov, Cand. Sci. (Geography), Associate Professor, Department of Environmental Engineering Technosphere, Institute Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Поступила: 11.03.2019; Получена после доработки: 26.02.2020; Принята к опубликованию: 22.06.2020.

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-4-141-151>



УДК 314

Сравнительный анализ основных характеристик человеческого капитала в Болгарии и России

П.Д. Шишманова

Экономическая академия им. Ценова, Свиштов 5250, Болгария

@Автор для переписки, e-mail: p.shishmanova@uni-svishtov.bg

Человеческий капитал является одним из основных факторов развития современной экономики. Его состояние и тенденции определяются конкретными условиями каждой страны. Целью данного исследования является изучение того, в какой степени различные политические и социально-экономические условия в Болгарии и России влияют на основные характеристики человеческого капитала, каковы основные проблемы его формирования и развития, и возможности их преодоления. Анализ человеческого капитала реализуется в количественном и качественном аспекте. Количественные характеристики в основном связаны с изменением численности населения, с его возрастной структурой и с состоянием здоровья. В качественном аспекте рассматриваются уровень образования населения и качество образовательной подготовки. Сравнительный анализ показывает, что у Болгарии и России много общего в состоянии и развитии человеческого капитала, но все-таки различия преобладают. В Болгарии население, а соответственно и трудовые ресурсы, стремительно сокращается, а в России изменения идут в положительном направлении. Учитывая тенденции в группе лиц моложе трудоспособного возраста, прогнозы для Болгарии также не являются оптимистичными. России все еще удастся поддерживать хорошее качество образования, а Болгария здесь отстывает от своих хороших позиций. Исходя из этого, сделан вывод о том, что различные политические и экономические условия в двух странах формируют специфический профиль человеческого капитала. Однако, у них есть и похожие проблемы. Они связаны с ограниченными финансовыми ресурсами, с низкой эффективностью государственных расходов, с дисбалансом в системах здравоохранения и образования, с возрастающей ролью наднациональных факторов человеческого капитала и др. Поэтому нужны быстрые и эффективные меры, нацеленные на модернизацию системы образования и здравоохранения, на изменение модели финансирования и его результатов, а также на адаптацию внешних моделей и политики к национальным особенностям и традициям.

Ключевые слова: человеческий капитал, трудовые ресурсы, образование, здравоохранение, занятость, безработица.

Для цитирования: Шишманова П.Д. Сравнительный анализ основных характеристик человеческого капитала в Болгарии и России. *Российский технологический журнал*. 2020;8(4):141-151. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-4-141-151>

A comparative analysis of the main characteristics of human capital in Bulgaria and Russia

Penka D. Shishmanova

D. A. Tsenov Academy of Economics, Svishtov 5250, Bulgaria

@Corresponding author, e-mail: p.shishmanova@uni-svishtov.bg

Human capital is one of the main factors in the development of the modern economy. Its condition and trends are determined by the specific conditions in each country. The purpose of this report is to examine the extent to which the different political and socio-economic conditions in Bulgaria and Russia affect the main characteristics of human capital. The analysis of the state of human capital is presented in quantitative and qualitative aspect. Quantitative characteristics are mainly related to changes in the population, its age structure and the state of its health. The educational level of the population and the quality of the educational training are considered in a qualitative aspect. The comparative analysis shows that Bulgaria and Russia have many similarities regarding the state and development of human capital, but the differences prevail. In Bulgaria, the population, as well as labor resources, are rapidly declining, and in Russia the changes are in a positive direction. Russia still manages to maintain a good quality of education, and Bulgaria is retreating from its good positions. On this basis, it is concluded that the different political and economic conditions in the two countries form a specific profile of their human capital, but generate similar problems. This imposes the need for rapid and effective measures aimed at modernizing education and health care systems, changing the funding model and its results, as well as adapting external models and policies to national specifics and traditions.

Keywords: human capital, labor resources, education, healthcare, employment, unemployment

For citation: Shishmanova P.D. A comparative analysis of the main characteristics of human capital in Bulgaria and Russia. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(4):141-151 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-4-141-151>

Человеческий капитал лежит в основе успешного функционирования любой экономики. Прошло то время, когда материальные факторы производства были в центре внимания. Сегодня их заменяют люди со своим интеллектом, знаниями и навыками. Развитие экономики и достижение экономического роста во многом зависят от количества, квалификации, мотивации и эффективности использования человеческого фактора [1–3]. У каждой страны есть свои особенности и отношение к человеческому капиталу –

от численности населения и людей трудоспособного возраста, до их качественных характеристик и государственной политики в этой области.

Исследование человеческого капитала в России и Болгарии представляет интерес, учитывая, что обе страны имеют значительное сходство и существенные различия в историческом и экономическом развитии. В годы тоталитаризма страны были связаны экономически и политически, но сегодня каждая страна движется своим особым путем.

Помимо объективных различий в географическом положении, территории, населении, природных ресурсах и т.д., страны отличаются выбором сценария экономического и политического развития. Болгария выбрала членство в Европейском Союзе и следование общей европейской политике, в то время как Россия вышла на самостоятельный путь, опираясь на свои собственные силы и возможности.

Цель данной статьи состоит в том, чтобы изучить текущее состояние человеческого капитала в рассматриваемых странах и проанализировать в какой степени указанные особенности влияют на его формирование и развитие, обозначить основные проблемы и возможности их преодоления.

Анализ человеческого капитала включает в себя период времени в диапазоне 2001–2018 гг. и реализуется в количественном и качественном аспекте.

Количественные характеристики человеческого капитала в основном связаны с изменением численности населения. В этом аспекте, в последнее десятилетие, Болгария столкнулась с серьезными проблемами. Они, в основном, объясняются тяжелым демографическим кризисом в стране. Среди его основных причин – низкая рождаемость и высокая смертность (которые определяют отрицательный естественный прирост населения), а также высокий уровень внешней миграции. По данным ООН, из 10 стран с наиболее быстро сокращающейся популяцией – девять находятся в Юго-Восточной Европе, а Болгария, по прогнозам, к 2050 году потеряет четверть своего населения. На протяжении всего периода нового тысячелетия естественный прирост населения был отрицательным, при этом неблагоприятная разница между рождаемостью и смертностью увеличивалась последние 10 лет и достигла – 6.5% в 2017-2018 годах.

Аналогичные значения наблюдались и в России. Но, в отличие от Болгарии, это происходило в начале рассматриваемого периода и объясняется, главным образом, последствиями тяжелого валютного и бюджетного кризиса 1998 года. После этого провала, в результате уменьшения смертности и принятия мер по материальному стимулированию рождаемости, произошло устойчивое снижение отрицательного роста, и в 2012 году эта тенденция изменилась – прирост стал положительным. В последние два года в соотношении рождаемости и смертности снова наблюдалось небольшое колебание, но в целом Россия имеет среднеевропейский уровень (ЕС-28) – 0.4% (рис.1).

И хотя годы с отрицательным естественным приростом в России преобладают в течение всего периода исследования, это не оказывает отрицательного влияния на численность населения в стране. Причиной является положительное сальдо миграции, которое, несмотря на количественные колебания, в значительной степени сглаживает отрицательную разницу между рождаемостью и смертностью. С 2008 года этот разрыв был полностью компенсирован (за исключением 2018 года), и уже сообщается об увеличении численности населения страны на 2.9%.

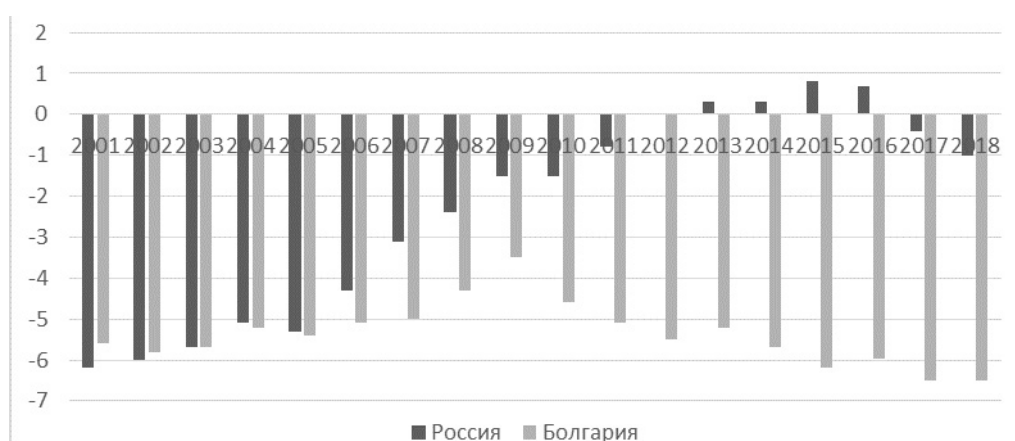


Рис. 1. Естественный прирост (на 1000 человек населения) [4-5].

К сожалению, в Болгарии баланс международной миграции за весь период имеет отрицательное значение (табл. 1). После вступления в ЕС, с получением возможности трудоустройства и проживания в других странах ЕС, количество болгар, покидающих страну, превышает количество людей, которые поселились в ней. Несмотря на то, что значения изменяются, число эмигрантов после начала мирового экономического кризиса увеличивается с каждым годом – с 9.5 тыс. человек в 2011 году до более чем, 33 тыс. человек в 2018 году, т.е. почти в 3.5 раза.

Таблица 1. Международная миграция – сальдо (человек) [4, 5]

Страна	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Россия	239943	242106	247449	158078	319761	294930	295859	280328	245384	261948	211878	124854
Болгария	-1397	-876	-15729	-24190	-4795	-2512	-1108	-2112	-4247	-9329	-5989	-3666

Наряду с рассмотренными процессами, в соответствии с глобальной тенденцией, в обеих странах наблюдается старение населения. Это означает увеличение удельного веса населения в возрасте старше трудоспособного, что ведет к ухудшению структуры человеческого капитала [6]. В настоящее время и в России, и в Болгарии жители в возрасте старше трудоспособного насчитывают около $\frac{1}{4}$ всего населения. Это более чем в 3 раза превышает международные стандарты старения населения (7%). Возрастная структура населения в этих двух странах также очень близка. Доля людей старше трудоспособного возраста составляет 21–25%, в трудоспособном возрасте – 56–63% и моложе трудоспособного возраста – 14–18%.

За сходством относительных показателей стоят разные тенденции и абсолютные значения по трем группам. Как показано на рис. 2, число россиян старше 65 лет увеличилось на 25%, а в Болгарии оно изначально уменьшилось, после чего этот процесс остановился и число оставалось относительно постоянным до конца периода. Численность населения трудоспособного возраста в обеих странах сокращается. Эта тенденция в России особенно заметна после 2006 года (8.7%), а в Болгарии – после 2007 года (12%), когда страна вступила в ЕС.

Отмеченные неблагоприятные тенденции для трудоспособного населения в принципе могут быть сглажены положительным изменением размера будущих трудовых

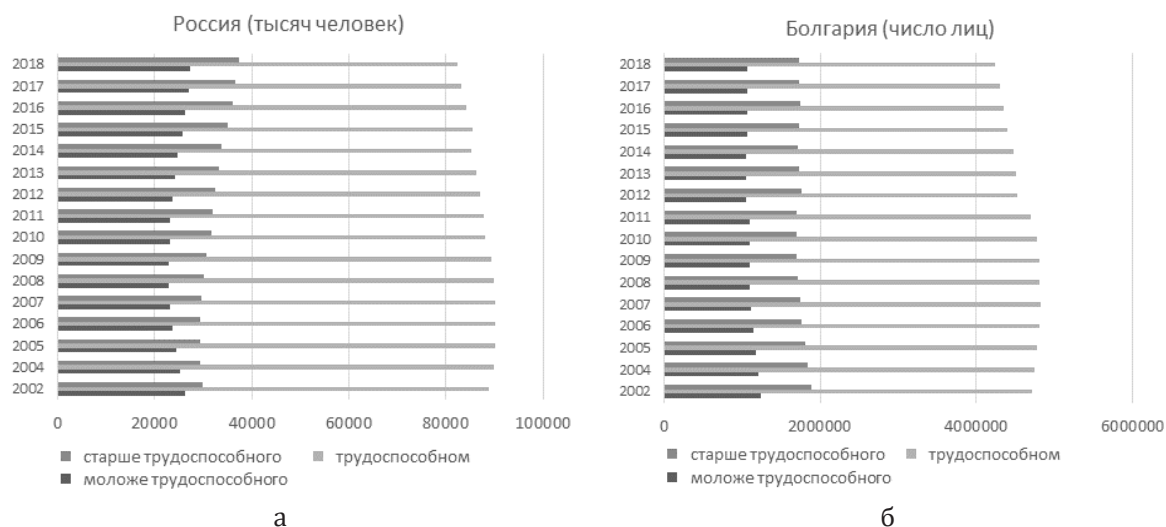


Рис. 2. Распределение населения по группам [4, 5].

ресурсов. Однако, страны имеют для этого разные предпосылки. В России улучшение темпов естественного прироста и активные иммиграционные процессы стимулируют рост населения моложе трудоспособного возраста. Это не только позволит сгладить негативные тенденции, но и может привести к увеличению предложения труда в стране (при создании соответствующих условий). В Болгарии эти факторы оказывают негативное влияние. Будущие трудовые ресурсы сокращаются, и, таким образом, будет формироваться постоянная нехватка рабочей силы, что при постоянной производительности труда приведет к снижению роста ВВП со всеми вытекающими отсюда негативными экономическими и социальными последствиями. Это ставит государство и бизнес перед необходимостью принимать новые решения об инвестициях в производство и, в основном, искать новые подходы в привлечении и мотивации персонала, его вознаграждении, непрерывном образовании, карьерном росте и многом другом.

Основным определяющим фактором количества трудовых ресурсов и одновременно важной характеристикой человеческого капитала является состояние здоровья населения. В течение рассматриваемого периода многие показатели состояния здоровья населения в Болгарии ухудшились. Общее количество госпитализированных лиц из-за различных заболеваний удвоилось, а число госпитализированных в трудоспособном возрасте увеличилось на 37%. Глубоко тревожные данные о снижении предельного возраста заболеваемости – количество госпитализированных детей и подростков до 17 лет увеличились на 48%. За последнее десятилетие число людей, страдающих онкологическими заболеваниями увеличилось на 20% [7]. Эти неблагоприятные тенденции являются результатом проводимой реформы здравоохранения в стране, нездорового образа жизни, недооценки профилактики, низких доходов и многого другого. Дополнительный негативный эффект создает недостаток финансовых ресурсов для здравоохранения и, как следствие – низкая оплата и потеря медицинских работников, недостаток и устаревание медицинского оборудования во многих медицинских учреждениях, низкое качество медицинских услуг.

В России также отмечают неблагоприятные тенденции в отношении здоровья населения – число зарегистрированных заболеваний в стране за рассматриваемый период увеличи-

лось на 10%, причем наиболее распространенными являются болезни органов дыхания и системы кровообращения. За период с 2005 по 2018 год общая заболеваемость детей в возрасте до 14 лет увеличилась на 23%, а 67% – имеют проблемы органов дыхания. За тот же период заболеваемость злокачественными новообразованиями увеличилась на 33% [8]. И, хотя из-за различных сроков, структуры и возрастного диапазона, данные для России и Болгарии не вполне сопоставимы, тем не менее ясно, что обе страны имеют схожие проблемы в области здравоохранения, и значительная их часть связана с недостаточным финансированием.

Согласно информации из Консолидированной финансовой программы Болгарии, за исследуемый период страна тратила 4–5% ВВП на здравоохранение и общая тенденция – восходящая [9]. Аналогичная тенденция наблюдается в России, но доля средств на здравоохранение, предусмотренных в Консолидированном бюджете Российской Федерации, несколько ниже – 3.2–3.4% [10]. И, хотя в абсолютном выражении эти расходы для обеих стран увеличиваются с каждым годом, они, как правило, остаются ниже среднего по ЕС28, составляющего 6–7%, а их относительные значения колеблются. Эта информация представляет Россию в менее благоприятном свете, поскольку страна обладает природными ресурсами, которые приносят серьезные бюджетные доходы, в отличие от энергозависимой Болгарии. Для сравнения, такие страны как США, Великобритания, Франция тратят на здравоохранение около 8–10% ВВП.

Начиная с 2019 года, в России запускается национальный проект в области здравоохранения, в котором определены 9 ключевых целей, связанных с улучшением здравоохранения и показателей здоровья населения [11]. Предварительно в федеральном бюджете на 2020 год было запланировано финансирование только 4 из этих целей, в основном связанных с сокращением смертности, а по остальным 5 целям – профилактика, улучшение первичной медицинской помощи и увеличение персонала в этих структурах – средства не были предусмотрены. Позже были внесены коррективы, и в принятом законе о бюджете было утверждено финансирование первичной медико-санитарной помощи с намерением удвоить его в течение последующих двух лет.

В Болгарии расходы на здравоохранение распределены также нерационально. В настоящее время наибольшая доля приходится на стационарную помощь, за которой следуют медикаменты. А стоимость профилактики и амбулаторного лечения – во много раз ниже. Соотношение между расходами на лечение и профилактику составляет 3:1. Причем, на одну только больничную помощь приходится почти половина стоимости.

Все это показывает, что как болгарская, так и российская системы здравоохранения ориентированы в основном на лечение болезней и их последствий, а не на профилактику и раннюю диагностику. Первый подход требует гораздо больше ресурсов и оказывает негативное влияние на качество человеческого капитала. Поэтому решение проблем в этой области экономики требует большей согласованности политики расходов и распределения функциональных затрат, гибкости и относительно более справедливого территориального распределения ресурсов, системного подхода в разработке стратегии здравоохранения и нового видения ее ключевых приоритетов.

Качественные характеристики человеческого капитала связаны с образованием. Результаты, достигнутые в этой области, рассматриваются в двух направлениях: уровень образования населения и качество образовательной подготовки.

По данным 2018 года, структура образования населения в возрасте 25–64 лет в Болгарии и России радикально отличаются. В Болгарии преобладают люди со средним образованием (55%), в то время как в России аналогичная доля специалистов с высшим образованием (56%). В обеих странах произошли положительные изменения за последние десять лет: доля населения со средним и высшим образованием увеличилась (с 88% до 95% для России и с 79% до 83% для Болгарии). В то время как доля лиц с образованием ниже среднего уменьшилась (с 11% до 5% по России и с 21% до 17% для Болгарии) (рис. 3). Следует отметить, что в то время как в Болгарии малообразованные группы населения уменьшаются лишь на несколько пунктов, в России это изменение более чем в два раза.

Представленная структура и тенденции в области образования по обе стороны являются следствием кумулятивного эффекта нескольких факторов – демографических изменений, состояния системы здравоохранения (о которых говорилось выше), изменения в правовой и институциональной основе образования, усиление конкуренции на рынке образования и труда, уменьшение финансирования образования и т. д.



Рис. 3. Образовательная структура населения [12, 13].

Доли расходов на образование в ВВП Болгарии и России очень близки и составляют 3–4%. Страны не достигают среднего европейского уровня (5% для ЕС–28), но разница с европейскими странами невелика. Интересным фактом является то, что в большинстве стран доля расходов на здравоохранение превышает расходы на образование (для некоторых разница в два раза), а в России – наоборот. Тем не менее, абсолютный объем выделяемых средств имеет положительную динамику и составляет значительную долю расходов в бюджете страны.

В связи с этим необходимо изучить *качество образования и профессиональной подготовки* обучаемых. Обратим внимание на среднее (включая начальное) и высшее образование, поскольку их результаты оказывают непосредственное влияние на рынок труда.

За рассматриваемый период в Болгарии больше всего выросли средства, выделяемые на среднее образование. Эти ресурсы занимают наибольшую долю в образовательной структуре и превышают общую сумму средств на другие уровни. В России аналогичные тенденции актуальны для общего образования. На его долю приходится более 40% всех расходов на образование [14]. Абсолютный и относительный рост этих средств предполагает увеличение результатов.

Для анализа использованы данные Международной программы по оценке образовательных достижений учащихся PISA, оценивающие функциональную грамотность школьников и умение применять знания на практике (табл. 2).

Данные для Болгарии из последних двух исследований PISA свидетельствуют о неудовлетворительной успеваемости болгарских учеников и снижении позиции страны в рейтинге международного исследования. По сравнению с ней, у России гораздо лучшие результаты. Хотя есть различия в результатах российских учеников в течение всего периода, тем не менее, положительная динамика во всех трех областях более выражена, а результаты лучше. В последнем исследовании (PISA 2018) Россия занимает 31-е место по читательской грамотности (479 баллов), 30-е место по математической грамотности (488 баллов) и 33-е место по естественнонаучной грамотности (478 баллов). Болгария занимает на 20 позиций ниже – соответственно 54-е (420 баллов), 49-е (436 баллов) и 56-е место (424 балла). Эта информация показывает, что несмотря на увеличение финансирования, качество болгарского образования снижается, а сам ресурс расходуется неэффективно. Учитывая наибольшую долю людей со средним образованием в Болгарии, это свидетельствует об ухудшении человеческого капитала и ограничение его будущего потенциала развития.

Таблица 2. Основные результаты международного исследования PISA [15]

Область измерения	Страна	2000	2003	2006	2009	2012	2015	2018	Сред. балл ОЭСР, 2018
Чтение	Болгария	430		402	429	436	432	420	487
	Россия	462	442	440	459	475	495	479	
Математика	Болгария	430		413	428	439	441	436	489
	Россия	478	468	476	468	482	494	488	
Естественные науки	Болгария			434	439	446	446	424	489
	Россия	460	489	479	478	486	487	478	

Качество высшего образования можно оценить по статусу выпускников на рынке труда, то есть как их достижения в сфере образования влияют на их занятость. Как уже упоминалось выше (рис. 3), в образовательной структуре России доля людей с высшим образованием в возрастной категории 25–64 года составляет более 50%. Согласно данным ОЭСР за 2018 год, уровень занятости этой группы населения составляет 83%, что всего на 2 пункта ниже среднего уровня по ОЭСР, а уровень безработицы составляет 3%. Еще лучше показатели для молодых специалистов (25–34 года) с высшим образованием (рис. 4). Их уровень занятости составляет 88%, что подтверждает мнение о том, что образованные молодые люди более предпочтительны на рынке труда. По сравнению со средними уровнями для ОЭСР (соответственно 84%, 6%, 11%), результаты России на несколько пунктов лучше. Однако, есть и некоторые негативные явления. Они относятся к долгосрочной безработице. По данным того же источника, россияне с высшим образованием, не имеющие работу и не нашедшие работу более 1 года, составляют 46%; лица со средним образованием – составляют 48%, а лица с более низким уровнем образования – 52%. Положительным моментом в данном случае является то, что с увеличением уровня образования долгосрочная безработица уменьшается.

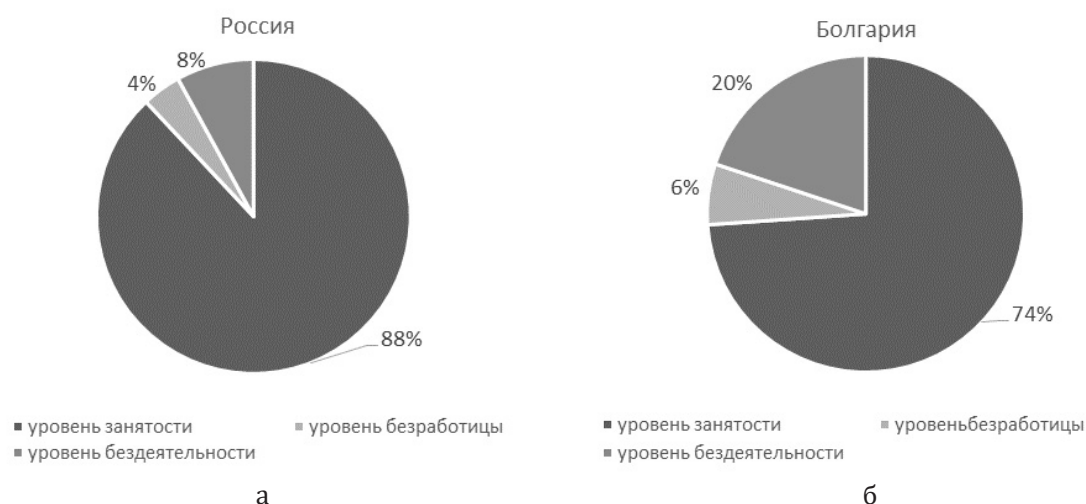


Рис. 4. Уровень занятости и безработицы населения (25–34 г.) с высшим образованием [12].

Для Болгарии значения рассматриваемых показателей аналогичны, но имеют свою специфику. У болгар с высшим образованием в трудоспособном возрасте уровень занятости и безработицы несколько лучше, чем в России – 86.1% и 2.4% соответственно, а для молодых образованных людей (25–34 года) эти значения менее благоприятны – уровень занятости составляет 74% и уровень безработицы составляет 6.2% (рис. 4). Вызывает беспокойство тот факт, что большая часть молодых болгарских специалистов неактивна. Они составляют 1/5 от общего количества. Это означает, что каждый пятый молодой человек с высшим образованием не работает и не ищет работу. В целом, показатели России лучше, учитывая, что выпускники университетов доминируют в ее образовательной структуре, а высокая доля молодежи среди них формирует оптимистичные тенденции в рабочей силе и человеческом капитале страны.

Имеется много причин для такого несоответствия между Болгарией и Россией, и, особенно, низких показателей Болгарии для категории молодых специалистов. Проявления демографического кризиса, агрессивной внешней образовательной и трудовой миграции, механическое применение европейских стандартов, метод финансирования и др. оказали сильное негативное влияние на высшее образование в Болгарии. В результате, в течение последнего десятилетия оно снижает критерии и качество созданного образовательного продукта и теряет многих своих потенциальных выпускников.

В России представленные положительные результаты связаны не только с относительно хорошим качеством высшего образования, но также с относительно ограниченной (по сравнению с Болгарией) международной миграцией высококвалифицированных работников и с большими размерами рынка труда. Однако, существует также ряд проблем, требующих серьезного внимания: значительное увеличение числа высших учебных заведений, многие из которых имеют только коммерческие цели; недостаточное финансирование и неэффективное использования средств на образование; кадровые проблемы; недостаточная связь образования с наукой и т.д.

Сравнительный анализ показывает, что у Болгарии и России много общего в состоянии и развитии человеческого капитала, но различия преобладают. Они в основном связа-

ны с демографическими тенденциями, изменениями потенциальных трудовых ресурсов и качеством образования. В Болгарии население, а соответственно и трудовые ресурсы, стремительно сокращается, а в России изменения идут в положительном направлении. Учитывая тенденции в группе лиц моложе трудоспособного возраста, прогнозы для Болгарии также не являются оптимистичными. России удастся поддерживать хорошее качество образования, особенно в области начального и среднего образования, а Болгария отстает от своих хороших позиций в среднем и высшем образовании.

Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что различные политические и экономические условия в двух странах формируют специфический профиль их человеческого капитала, но порождают аналогичные проблемы. Они связаны с ограниченными финансовыми ресурсами, низкой эффективностью государственных расходов, дисбалансом в системах здравоохранения и образования, возрастающей ролью наднациональных факторов человеческого капитала и др. Поэтому обеим странам необходимы быстрые и эффективные меры для решения этих проблем и адаптации к глобальной динамике. Они должны быть нацелены на модернизацию систем образования и здравоохранения, изменение модели финансирования и его результатов, а также адаптацию внешних моделей и политики к национальным особенностям и традициям. Реализация этих мер требует согласованных усилий всех заинтересованных сторон на всех уровнях – общества, правительства, работодателей и кадров – в целях повышения качества человеческого капитала и потенциала роста экономики.

Литература:

1. Тофлър, А. и Х. Новата цивилизация. Политиката на третата вълна, София. Обсидиан, 1995. С. 47-49.
2. Добрынин, А., С. Дятлов, Е. Цыренова. Человеческий капитал в транзитивной экономике, СПб.: Наука. 1999. с. 96-129.
3. Шишманова, П. Икономически аспекти на човешкия капитал в България, В. Търново, Абагар, 2008, с.7.
4. Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]
URL: <https://www.gks.ru/folder/12781>.
5. Национален статистически институт [Электронный ресурс]
URL: <https://www.nsi.bg/bg/content/>
6. Семеко, Г. В. Старение населения в России и его последствия // Экономические и социальные проблемы России: Сб. науч. тр. / РАН М. 2013. №2. с. 7-35 [Электронный ресурс]
URL: http://inion.ru/site/assets/files/2702/2013_espr_2.pdf
7. Здравеопазване 2019 [Электронный ресурс]
URL: https://www.nsi.bg/sites/default/files/files/publications/Zdraveopazvane_2019.pdf
8. Здравоохранение в России 2019 [Электронный ресурс]
URL: <https://gks.ru/storage/mediabank/Zdravoohran-2019.pdf>
9. Консолидирана фискална програма [Электронный ресурс]
URL: <https://www.minfin.bg/bg/statistics/13>
10. Консолидированный бюджет РФ [Электронный ресурс]
URL: <https://www.minfin.ru/ru/statistics/conbud/>
11. Национальный проект «Здравоохранение» [Электронный ресурс]
URL: <http://static.government.ru/media/files/TVIdAva2IHGtqxvRQAQlZABZ2dAna23R.pdf>
12. Education at a Glance. OECD Indicators 2015, 2018 [Электронный ресурс]
URL: https://read.oecd-ilibrary.org/education/education-at-a-glance-2015_eag-2015-en#page46;
https://read.oecd-ilibrary.org/education/education-at-a-glance-2018_eag-2018-en#page1
13. Образование в Република България 2011, 2019 [Электронный ресурс]
URL: <https://www.nsi.bgsites/default/files/files/publications/education2011.pdf>;
<https://www.nsi.bg/sites/default/files/files/publicationseducation2019.pdf>
14. Образование в цифрах: 2019 [Электронный ресурс]
URL: <https://www.hse.ru/data/2019/08/12/1483728373/oc2019.PDF>
15. Programme for International Student Assessment [Электронный ресурс]
URL: <https://www.oecd.org/pisa>

References:

1. Toflar A. i H. Creating a new civilization: The politics of the third wave. Sofia: Obsidian Publ. 1995. P. 47-49. (in Bulg.)
2. Dobrynin, A., Dyatlov S., Tsyrenova E.. Human capital in a transitional economy. Sankt-Peterburg: Nauka Publ. 1999. p. 96-129 (in Russ.)
3. Shishmanova P. Economic aspects of human capital in Bulgaria, V. Tarnovo: Abagar Publ. 2008. p. 7 (in Bulg.)
4. Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki [Electronic resource] (in Russ.).
URL: <https://www.gks.ru/folder/12781>.
5. Natsionalen statisticheski institut [Electronic resource] (in Bulg.).
URL: <https://www.nsi.bg/bg/content/>
6. Semeko G. V. Population aging in Russia and its consequences // Ekonomicheskiye i sotsial'nyye problemy Rossii. Economic and social problems of Russia. Sb. nauch. tr. / RAN M. 2013. №2. s. 7-35 [Electronic resource] (in Russ.).
7. Healthcare 2019 [Electronic resource] (in Bulg.).
URL: https://www.nsi.bg/sites/default/files/files/publications/Zdraveopazvane_2019.pdf
8. Healthcare in Russia 2019 [Electronic resource] (in Russ.).
URL: <https://gks.ru/storage/mediabank/Zdravooohran-2019.pdf>
9. Consolidated fiscal program [Electronic resource] (in Bulg.).
URL: <https://www.minfin.bg/bg/statistics/13>
10. Consolidated Budget of the Russian Federation [Electronic resource] (in Russ.).
URL: <https://www.minfin.ru/ru/statistics/conbud/>
11. National project «Healthcare» [Electronic resource] (in Russ.).
URL: <http://static.government.ru/media/files/TVIdAva2IHGtqxvRQAQlZABZ2dAna23R.pdf>
12. Education at a Glance. OECD Indicators 2015, 2018 [Electronic resource].
URL: https://read.oecd-ilibrary.org/education/education-at-a-glance-2015_eag-2015-en#page46;
https://read.oecd-ilibrary.org/education/education-at-a-glance-2018_eag-2018-en#page1
13. Education in the Republic of Bulgaria 2011, 2019 [Electronic resource] (in Bulg.).
URL: <https://www.nsi.bg/sites/default/files/files/publications/education2011.pdf>;
<https://www.nsi.bg/sites/default/files/files/publications/education2019.pdf>
14. Education in numbers: 2019 [Electronic resource] (in Russ.).
URL: <https://www.hse.ru/data/2019/08/12/1483728373/oc2019.PDF>
15. Programme for International Student Assessment [Electronic resource].
URL: <https://www.oecd.org/pisa>

Об авторе:

Шишманова Пенка Димитрова, доктор экономических наук, профессор кафедры Общей теории экономики Экономической академии им. Ценова (5250, Болгария, г. Свиштов, ул. Ем. Чакъров, д. 2). E-mail: p.shishmanova@uni-svishtov.bg

About the author:

Penka D. Shishmanova, D.Sc. (Economics), Professor, Department of General Economic Theory, D. A. Tsenov Academy of Economics (2, Em. Chakrov Str., Svishtov 5250, Bulgaria). E-mail: p.shishmanova@uni-svishtov.bg

Поступила: 13.05.2020; Получена после доработки: 28.05.2020; Принята к опубликованию: 18.06.2020.

Свидетельство о регистрации СМИ Эл № ФС 77-74578 от 14 декабря 2018 г.

Дата опубликования 31 июля 2020 г.

МИРЭА – Российский технологический университет
119454, Москва, пр. Вернадского, 78.

<https://www.rtfj-mirea.ru>

