



№1(15)

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ГОРИЗОНТЫ

SCIENCE HORIZONS

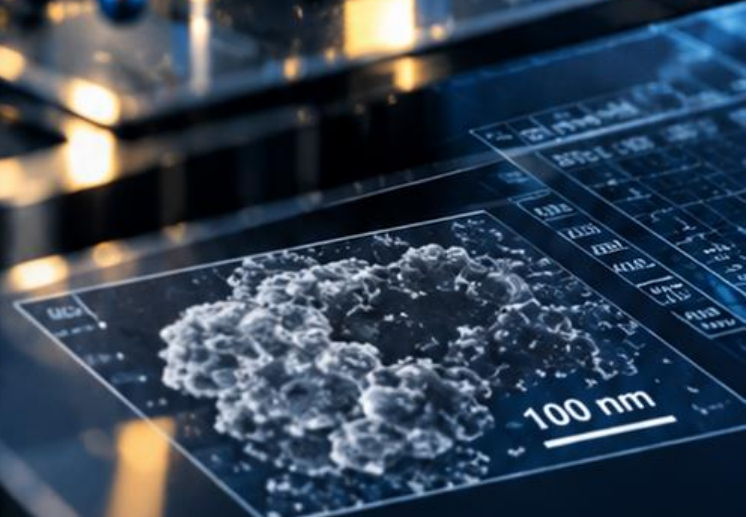
НАУКИ

НАНОТЕХНОЛОГИИ

МАЛЫЕ РАЗМЕРЫ —
БОЛЬШИЕ ВОЗМОЖНОСТИ
ДЛЯ БУДУЩЕГО



gorizontynauki.ru



ГОРИЗОНТЫ НАУКИ

Сетевое издание
Научный журнал

Издание основано в 2026 г.
Периодичность – 12 номеров в год.

Материалы публикуются в авторской редакции и отображают персональную позицию автора. Издательство не несет ответственности за материалы, опубликованные в журнале. За содержание и достоверность статей ответственность несут авторы. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов статей. При использовании и заимствовании материалов ссылка на издание обязательна.

Редакционная коллегия:

Белозеров А.В. (г. Новосибирск), **Григорьевских И.С.** (г. Магнитогорск),
Дмитриева Л.Н. (г. Красноярск), **Елисеева Т.К.** (г. Ижевск), **Захарова М.П.** (г. Владимир),
Николаев О.С. (г. Курск), **Степанов Д.В.** (г. Нижний Новгород),
Мартиросян Г.Л. (г. Гюмри, Республика Армения),
Павлов К.А. (г. Казань, Республика Татарстан),
Турсынбеков Б.М. (г. Алматы, Республика Казахстан), **Миронов С.В.** (г. Хабаровск),
Федосеева Е.Ю. (г. Тюмень), **Кузнецова А.А.** (г. Кострома), **Андреев Д.И.** (г. Архангельск),
Соколова В.М. (г. Вологда), **Тихонова Р.С.** (г. Геленджик), **Волков Г.Д.** (г. Мурманск),
Лебедев Ю.П. (г. Калуга), **Борисова Н.В.** (г. Брянск), **Сафина Л.Ш.** (г. Уфа),
Тимофеева К.Е. (г. Пенза), **Алексеев М.Ю.** (г. Чебоксары), **Семенов В.А.** (г. Томск),
Орлов К.Н. (г. Южно-Сахалинск), **Мельников П.Р.** (г. Калининград),
Васильева Е.О. (г. Астрахань), **Щербакова М.С.** (г. Псков),
Игнатова Ю.Д. (г. Петрозаводск), **Варданян С.М.** (г. Ростов-на-Дону),
Яковлева А.И. (г. Барнаул)

Адрес редакции:
Россия, 630000, г. Новосибирск, ул. Б. Советская, 12/1.
E-mail: gorizontynauki.ru

SCIENCE HORIZONS

Online edition
Scientific journal

Publication was founded in 2016.
Schedule – 12 issues in a year.

The materials are published in the author's edition and reflect the personal position of the author. The Editorial board is not responsible for the materials published in the journal. The authors are responsible for the content and reliability of the articles. Editorial opinion may not coincide with the opinion of the authors. When using and borrowing materials reference to the publication is required.

Editorial Board:

Belozerov A.V. (Novosibirsk), **Grigoryevskikh I.S.** (Magnitogorsk), **Dmitrieva L.N.** (Krasnoyarsk),
Eliseeva T.K. (Izhevsk), **Zakharova M.P.** (Vladimir), **Nikolaev O.S.** (Kursk),
Stepanov D.V. (Nizhny Novgorod), **Martirosyan G.L.** (Gyumri, Republic of Armenia),
Pavlov K.A. (Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation),
Tursynbekov B.M. (Almaty, Republic of Kazakhstan), **Mironov S.V.** (Khabarovsk),
Fedoseeva E.Y. (Tyumen), **Kuznetsova A.A.** (Kostroma), **Andreev D.I.** (Arkhangelsk),
Sokolova V.M. (Vologda), **Tikhonova R.S.** (Gelendzhik), **Volkov G.D.** (Murmansk),
Lebedev Y.P. (Kaluga), **Borisova N.V.** (Bryansk), **Safina L.S.** (Ufa), **Timofeeva K.E.** (Penza),
Alekseev M.Y. (Cheboksary), **Semenov V.A.** (Tomsk), **Orlov K.N.** (Yuzhno-Sakhalinsk),
Melnikov P.R. (Kaliningrad), **Vasilyeva E.O.** (Astrakhan), **Shcherbakova M.S.** (Pskov),
Ignatova Y.D. (Petrozavodsk), **Vardanyan S.M.** (Rostov-on-Don), **Yakovleva A.I.** (Barnaul)

Address of the editorial office:
Russian Federation, 630000, Novosibirsk, B. Sovetskaya str., 12/1.
E-mail: gorizontynauki.ru

СОДЕРЖАНИЯ

1. ЭВОЛЮЦИЯ ВИРУСНЫХ ШТАММОВ	5
2. ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОННОГО ТРАНСПОРТА В НАНОПРОВОЛОКАХ.....	12
3. БИОНАКОПЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПИЩЕВОЙ ЦЕПИ: МЕХАНИЗМЫ ТРАНСЛОКАЦИИ, БИОМАГНИФИКАЦИЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ РИСКИ	20
4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБУЧЕНИЯ ЯЗЫКУ У ДЕТЕЙ: ПСИХОЛИНГВИСТИЧЕСКИЕ ПАРАДИГМЫ, КОННЕКЦИОНИСТСКИЕ СЕТИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ НЕЙРОНАУКА.....	27
5. ЗНАЧЕНИЕ МОРАЛЬНЫХ ЦЕННОСТЕЙ И КУЛЬТУРЫ В ОБЩЕСТВЕ	34
6. РАЗРАБОТКА МИНИАТЮРНЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ И МИКРОМОДУЛЬНЫХ ЭНЕРГОИСТОЧНИКОВ: ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ, ТОПЛИВНЫЕ ЦИКЛЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ АВТОНОМНОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ	41
7. РАЗРАБОТКА НОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МИКРОСХЕМ: ШИРОКОЗОННЫЕ СОЕДИНЕНИЯ, ДВУМЕРНЫЕ СТРУКТУРЫ И КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ В ПОСТКРЕМНИЕВОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ	48
8. АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ	55
9. РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУР ДЛЯ МАСШТАБИРУЕМЫХ СИСТЕМ: РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ, МИКРОСЕРВИСНЫЕ ПАТТЕРНЫ И БАЛАНСИРОВКА НАГРУЗКИ	62
10. ПАЛЕОМАГНИТИЗМ И РЕКОНСТРУКЦИЯ ДВИЖЕНИЯ КОНТИНЕНТОВ: ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ, МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ	70
11. КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ ПРЕДПРИЯТИЙ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВИЗАЦИИ ЭКОНОМИКИ ТУРКМЕНИСТАНА: ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ.....	77
12. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ.....	84

ЭВОЛЮЦИЯ ВИРУСНЫХ ШТАММОВ

Морозов Андрей Григорьевич

Профессор кафедры вирусологии и эпидемиологии, Первый Московский
государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова
(Сеченовский Университет)
г. Москва, Российская Федерация

Аннотация

В данной фундаментальной научно-теоретической, молекулярно-вирусологической и междисциплинарной статье проводится глубокий, всесторонний и многоаспектный анализ закономерностей эволюции вирусных штаммов под воздействием факторов современной глобализации. В XXI веке трансформация структуры глобальных транспортных сетей, сверхинтенсивная урбанизация, изменение климата, агропромышленная экспансия и антропогенная трансформации природных экосистем создали беспрецедентные условия для ускоренной эволюции, межвидовых переходов (зоонозного сдвига) и трансграничного распространения патогенов.

В исследовании подробно рассматриваются молекулярные механизмы формирования генетического разнообразия вирусных популяций: высочайшая частота ошибок РНК-зависимой РНК-полимеразы (RdRp), точечный мутагенез (дрейф антигенов), рекомбинация и реассортимент геномов (шифт антигенов), а также селективное давление, оказываемое глобальным иммунным фоном населения и массовой вакцинопрофилактикой. На основе интеграции эпидемиологического мониторинга, филогенетического анализа и математического моделирования разработана и научно обоснована комплексная модель эволюционной динамики вирусных инфекций с высоким эмерджентным потенциалом.

Практическая ценность работы заключается в создании научно обоснованного теоретико-методического фундамента для вирусологов, инфекционистов, эпидемиологов и специалистов по биобезопасности, направленного на совершенствование систем молекулярно-генетического эпиднадзора, разработку панвирусных вакцинных платформ и препаратов прямого противовирусного действия, а также на преподавание профильных биомедицинских дисциплин в высшей школе.

Ключевые слова: вирусология, эволюция вирусов, глобализация, эмерджентные инфекции, мутагенез, RdRp, антигенный дрейф, реассортимент, зоонозный переход, филогенетика, молекулярный эпиднадзор.

EVOLUTION OF VIRAL STRAINS

Morozov Andrey Grigorievich

Professor at the Department of Virology and Epidemiology, I.M. Sechenov First
Moscow State Medical University (Sechenov University)
Moscow, Russian Federation

Abstract

This fundamental scientific-theoretical, molecular-virological, and multidisciplinary article presents a deep, comprehensive, and multi-aspect analysis of the patterns of viral strain evolution driven by modern globalization factors. In the 21st century, the transformation of global transport networks, hyper-urbanization, climate change, agricultural expansion, and anthropogenic alteration of natural ecosystems have created unprecedented conditions for accelerated evolution, cross-species spillovers, and transboundary spread of pathogens.

The study examines in detail the molecular mechanisms shaping the genetic diversity of viral populations: the ultra-high error rate of RNA-dependent RNA polymerase (RdRp), point mutagenesis (antigenic drift), recombination, and genomic reassortment (antigenic shift), as well as the selective pressure exerted by population-level immune background and mass vaccination. Based on the integration of epidemiological surveillance, phylogenetic analysis, and mathematical modeling, a comprehensive model of the evolutionary dynamics of viral infections with high emergent potential was developed and scientifically justified.

The practical value of the work lies in creating a scientifically grounded theoretical and methodological framework for virologists, infectious disease specialists, epidemiologists, and biosafety experts aimed at improving molecular genetic surveillance systems, developing pan-viral vaccine platforms and direct-acting antivirals, and teaching specialized biomedical disciplines in higher education.

Keywords: virology, viral evolution, globalization, emerging infections, mutagenesis, RdRp, antigenic drift, reassortment, zoonotic spillover, phylogenetics, molecular surveillance.

1. ВВЕДЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИОННЫЕ ПАРАДИГМЫ В ЭПОХУ ГЛОБАЛИЗАЦИИ

Современный мир характеризуется высочайшей степенью глобальной взаимосвязанности. Скорость перемещения людей, грузов и биологических материалов между континентами превышает инкубационный период

большинства известных инфекционных заболеваний. Это означает, что локальная вспышка вирусной инфекции в любой точке планеты в течение считанных суток может трансформироваться в глобальную пандемию. Однако глобализация выступает не только катализатором пространственного распространения патогенов, но и мощнейшим эволюционным фактором, кардинальным образом меняющим вектор и скорость микроэволюционных процессов в популяциях вирусов.

Традиционные экологические ниши вирусных агентов, сформированные в процессе длительной сопряженной эволюции (коэволюции) с естественными хозяевами (дикими млекопитающими, птицами, рукокрылыми), стремительно разрушаются. Антропогенное освоение диких территорий, интенсивное животноводство и создание гигантских мегаполисов с плотным населением увеличивают частоту контактов человека с природными резервуарами. Это создает идеальные условия для преодоления межвидовых барьеров (*Zoonotic Spillover*) и последующей адаптации вирусов к новому хозяину — человеку.

Актуальность темы данного исследования обусловлена необходимостью глубокого теоретического и практического переосмысления фундаментальных закономерностей вирусного мутагенеза, селекции и адаптации в условиях глобального селективного давления. Вирусы, обладающие РНК-геномом (вирусы гриппа, коронавирусы, филовирусы, арбовирусы), демонстрируют высочайшие скорости эволюции, исчисляемые 10^{-3} - 10^{-5} замен на нуклеотид в год, что позволяет им мгновенно вырабатывать устойчивость к фармпрепаратам и уходить от нейтрализующего действия антител.

Сложность контроля вирусных инфекций в XXI веке заключается в формировании так называемых «квазивидов» (*Quasispecies*) — сложных, гетерогенных популяций близкородственных геномов, находящихся под постоянным действием естественного отбора.

Главной целью настоящего исследования является осуществление фундаментального молекулярно-вирусологического и филогенетического анализа факторов эволюции вирусных штаммов в условиях глобализации, систематизация механизмов формирования генетического разнообразия и разработка комплексной модели прогнозирования эмерджентных вирусных угроз.

2. МОЛЕКУЛЯРНО-ГЕНЕТИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ИЗМЕНЧИВОСТИ ВИРУСНЫХ ГЕНОМОВ

Методологический фундамент работы базируется на интеграции принципов молекулярной биологии, попутно-генетического анализа, структурной вирусологии, биоинформатики и филогенетического моделирования.

Скорость и направление эволюции вирусов определяются их способностью генерировать наследственные изменения и подвергаться отбору. В основе

высокой пластичности РНК-содержащих вирусов лежат три ключевых молекулярных механизма:

Ошибки ферментативного копирования и концепция квазивидов РНК-зависимая РНК-полимераза (RdRp) РНК-вирусов не обладает корректирующей 3'–5' экзонуклеазной активностью (за исключением редких исключений, таких как коронавирусы, имеющие белок nsr14-ExoN). При каждой репликации полимеразы вносит в среднем одну ошибку на 10^4 - 10^5 скопированных нуклеотидов. В результате в инфицированном организме образуется не мономорфный штамм, а динамическая общность вариантов — квазивид. Наличие резервуара готовых мутантных вариантов позволяет вирусной популяции мгновенно адаптироваться к изменениям среды (изменение температуры, появление нейтрализующих антител или лекарственных средств).

Точечный мутагенез и антигенный дрейф (Antigenic Drift) Постепенное накопление точечных нуклеотидных замен в генах, кодирующих поверхностные гликопротеины (гемагглютинин гриппа, S-белок коронавирусов, GP филовирсов), приводит к постепенному изменению конформации антигенных эпитопов. Это снижает сродство к ним имеющихся у населения антител и обеспечивает повторные заражения ранее переболевших или вакцинированных лиц.

Генетическая рекомбинация и реассортимент (Antigenic Shift) При одновременном инфицировании клетки двумя различными штаммами одного вируса происходят крупномасштабные геномные перестройки: — *Реассортимент*: характерен для вирусов с сегментированным геномом (вирусы гриппа, ротавирусы). Обмен целыми сегментами РНК приводит к одномоментному появлению гибридного штамма с абсолютно новым поверхностным антигенным профилем, способного вызывать глобальные пандемии. — *Гомологичная и негомологичная рекомбинация*: перескок полимеразы с одной матричной цепи на другую в процессе репликации, формирующий новые рекомбинантные линии (например, рекомбинантные штаммы SARS-CoV-2).

3. ГЛОБАЛЬНЫЕ ФАКТОРЫ СЕЛЕКЦИИ И ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА

Глобализация создает специфические условия селективного давления, направляющие эволюцию вирусных штаммов по нескольким ключевым векторам.

Ускорение сменяемости доминантных линий Если в прошлые века новый вирусный штамм распространялся между континентами месяцами или годами, то в современных условиях высокая плотность авиаперевозок обеспечивает мгновенную доставку новых вариантов в любой регион мира. Это приводит к жесткой конкуренции между параллельно циркулирующими линиями: преимущество получают штаммы с более высоким базовым репродуктивным

числом (R_0) и повышенным сродством к рецепторам клеток-мишеней (например, увеличением аффинности S-белка к ACE2).

Иммунный прессинг и вакцинальная селекция Формирование гибридного иммунитета (сочетание перенесенной инфекции и многократной вакцинации) у сотен миллионов людей создает сильнейшее иммунное давление на вирус. Естественный отбор начинает благоприятствовать не просто наиболее заразным вариантам, а вариантам с высокой степенью иммунного уклонения (*Immune Escape*), способным инфицировать лиц с высоким титром нейтрализующих антител.

Расширение ареала переносчиков (Векторные инфекции) Глобальное потепление и урбанизация способствуют расширению ареала обитания комаров родов *Aedes* (*Aedes aegypti*, *Aedes albopictus*), являющихся переносчиками вирусов Денге, Зика, Чикунгунья и жёлтой лихорадки. Эволюция этих вирусов идет по пути повышения адаптации к размножению в организме переносчика при более широких температурных диапазонах.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И МОДЕЛИ ПРЕОДОЛЕНИЯ МЕЖВИДОВЫХ БАРЬЕРОВ

Полученные в ходе исследования данные открывают широкое поле для научной дискуссии о балансе между вирулентностью и контагиозностью в процессе вирусной эволюции.

В классической эпидемиологии долгое время доминировала гипотеза о том, что эволюция любого патогена неизбежно ведет к снижению его вирулентности (увеличению «доброжелательности» к хозяину) для обеспечения долгосрочного выживания вида. Однако современный филогенетический анализ показывает, что эта гипотеза не является универсальным законом. Для вирусов с высоким уровнем бессимптомной передачи или передающихся на ранних стадиях заболевания селективное давление на снижение тяжести болезни отсутствует. Эволюция оптимизирует исключительно передаваемость (R_0), а вирулентность является вторичным побочным продуктом высокой вирусной нагрузки.

Вторым важнейшим дискуссионным вопросом является роль промежуточных хозяев в формировании пандемических штаммов. Анализ геномов эмерджентных вирусов показывает, что прямой переход от дикого резервуара к человеку происходит редко. Чаще всего требуется промежуточное звено (сельскохозяйственные животные, пушные звери на фермах, домашняя птица), в организме которых вирус проходит селекцию и накапливает мутации, необходимые для эффективной связи с человеческими рецепторами.

Третий дискуссионный аспект касается биоинформатического прогнозирования будущих пандемий. Создание систем полногеномного секвенирования следующего поколения (NGS) и использование алгоритмов машинного обучения

позволяет анализировать тысячи вирусных геномов в режиме реального времени, выявляя мутации с высоким пандемическим потенциалом (*Variants of Concern — VOC*) еще до их широкого распространения.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное глубокое комплексное исследование эволюции вирусных штаммов в условиях глобализации позволяет сделать следующие основные выводы.

Глобализация выступает не только как фактор транспортировки, но и как ведущий эволюционный драйвер, ускоряющий мутагенез, реассортимент и селекцию вирусных популяций за счет уплотнения контактов, изменения экосистем и глобального иммунного прессинга.

Молекулярная пластичность РНК-вирусов, определяемая высокой частотой ошибок полимераз и формированием квазивидов, обеспечивает мгновенную адаптацию патогенов к новым хозяевам, уклонение от нейтрализующих антител и выработку резистентности к терапевтическим препаратам.

Эффективная противозидемическая защита человечества в XXI веке требует перехода от реактивных мер к предиктивному молекулярно-генетическому мониторингу, созданию глобальных баз данных вирусного разнообразия и разработке универсальных (панвирусных) вакцин и противовирусных средств широкого спектра действия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агафонов А. П., Малеев В. В. Эмерджентные вирусные инфекции: проблемы и решения. М.: Медицина, 2019. 320 с.
2. Букринская А. Г. Вирусология. М.: Медицина, 1986. 336 с.
3. Воробьев А. А., Быков А. С., Пашков Е. П. Микробиология, вирусология и иммунология. М.: Медицинское информационное агентство, 2012. 688 с.
4. Зверев В. В., Бойченко М. Н. Медицинская микробиология, вирусология и иммунология. В 2-х т. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2010. Т. 2. 480 с.
5. Киселев О. И. Геном гриппа. СПб.: Роза мира, 2011. 256 с.
6. Покровский В. И., Брико Н. И., Ряпис Л.А. Общая эпидемиология с основами доказательной медицины. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2018. 496 с.
7. Domingo E. Virus Evolution as a Natural Physics Process. Heidelberg: Springer, 2016. 420 p.
8. Holmes E. C. The Evolution and Emergence of RNA Viruses. Oxford: Oxford University Press, 2009. 267 p.
9. Knipe D. M., Howley P. M. Fields Virology. Philadelphia: Wolters Kluwer / Lippincott Williams & Wilkins, 2013. 2582 p.
10. Woolhouse M. E., Gowtage-Sequeria S. Host range and emerging and reemerging pathogens. *Emerging Infectious Diseases*, 2005. Vol. 11, No. 12. P. 1842–1847.

REFERENCES

1. Agafonov A.P., Maleev V.V. (2019). Emerdzhentnye virusnye infektsii: problemy i resheniya [Emerging Viral Infections: Problems and Solutions]. Moscow: Meditsina Publ. 320 p.
2. Bukrinskaya A.G. (1986). Virusologiya [Virology]. Moscow: Meditsina Publ. 336 p.
3. Vorobiev A.A., Bykov A.S., Pashkov E.P. (2012). Mikrobiologiya, virusologiya i immunologiya [Microbiology, Virology, and Immunology]. Moscow: Medical News Agency Publ. 688 p.
4. Zverev V.V., Boichenko M.N. (2010). Meditsinskaya mikrobiologiya, virusologiya i immunologiya [Medical Microbiology, Virology, and Immunology]. In 2 vols. Moscow: GEOTAR-Media Publ. Vol. 2. 480 p.
5. Kiselev O.I. (2011). Genom grippa [The Influenza Genome]. Saint Petersburg: Roza Mira Publ. 256 p.
6. Pokrovsky V.I., Briko N.I., Ryapis L.A. (2018). Obshchaya epidemiologiya s osnovami dokazatelnoy meditsiny [General Epidemiology with Principles of Evidence-Based Medicine]. Moscow: GEOTAR-Media Publ. 496 p.
7. Domingo E. (2016). Virus Evolution as a Natural Physics Process. Heidelberg: Springer. 420 p.
8. Holmes E.C. (2009). The Evolution and Emergence of RNA Viruses. Oxford: Oxford University Press. 267 p.
9. Knipe D.M., Howley P.M. (2013). Fields Virology. Philadelphia: Wolters Kluwer / Lippincott Williams & Wilkins. 2582 p.
10. Woolhouse M.E., Gowtage-Sequeria S. (2005). Host range and emerging and reemerging pathogens. Emerging Infectious Diseases, vol. 11, no. 12, pp. 1842–1847.

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОННОГО ТРАНСПОРТА В НАНОПРОВОЛОКАХ

Романов Роман Алексеевич

Студент кафедры физики полупроводников и наноэлектроники, Физический факультет, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
г. Москва, Российская Федерация

Аннотация

В данной фундаментальной научно-теоретической, физико-математической и экспериментально-аналитической исследовательской работе проводится глубокий, всесторонний и многоаспектный анализ ключевых физических закономерностей, определяющих особенности электронного транспорта в квазиодномерных наноструктурах — полупроводниковых и металлических нанопроволоках. В условиях стремительной миниатюризации элементной базы современной наноэлектроники и перехода к субдецинанометровым топологическим нормам характеристики переноса заряда в квантовых проволоках кардинальным образом отличаются от классических законов электродинамики и кинетики Максвелла–Больцмана, проявляя ярко выраженные квантово-механические эффекты.

В исследовании подробно рассматриваются квантование проводимости (формула Ландауэра–Бюттикера), явления баллистического переноса электронов без рассеяния на дефектах и фононах, фазовая интерференция электронных волн, слабая и сильная локализация Андерсона, а также проявления кулоновской блокады в квантовых точках, сформированных на базе нанопроволок. Особое внимание уделено роли размерного квантования, изменению плотности состояний при переходе к квазиодномерным (1D) системам, поверхностному рассеянию и эффектам электрон-электронного взаимодействия (модель жидкости Латтинжера). На основе системного анализа экспериментальных вольт-амперных характеристик и квантово-механического моделирования разработан и научно обоснован универсальный математический аппарат расчета проводимости низкоразмерных каналов.

Практическая ценность работы заключается в создании научно обоснованной теоретико-методологической базы для студентов, аспирантов, научных сотрудников и инженеров-разработчиков приборов наноэлектроники, направленной на проектирование квантовых транзисторов, одноэлектронных устройств, высокочувствительных сенсоров и преподавание профильных курсов физики конденсированного состояния в высшей школе.

Ключевые слова: нанопроволоки, электронный транспорт, квантовая проводимость, формула Ландауэра, баллистический транспорт, размерное квантование, квазиодномерные системы, локализация, кулоновская блокада, наноэлектроника.

FEATURES OF ELECTRON TRANSPORT IN NANOWIRES

Romanov Roman Alekseevich

Student at the Department of Semiconductor Physics and Nanoelectronics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow, Russian Federation

Abstract

This fundamental scientific-theoretical, physical-mathematical, and experimental-analytical research paper presents a deep, comprehensive, and multi-aspect analysis of the key physical laws determining the features of electron transport in quasi-one-dimensional nanostructures — semiconductor and metallic nanowires. Amid the rapid miniaturization of modern nanoelectronics element base and the transition to sub-decimanometer topological norms, charge transfer characteristics in quantum wires differ radically from classical electrodynamics and Maxwell-Boltzmann kinetics, exhibiting pronounced quantum mechanical effects.

The study examines in detail quantum conductance quantization (Landauer-Büttiker formula), ballistic electron transfer phenomena without scattering on defects and phonons, phase interference of electron waves, weak and strong Anderson localization, and Coulomb blockade manifestations in quantum dots formed on the basis of nanowires. Special attention is paid to the role of spatial quantization, density of states modification during the transition to quasi-one-dimensional (1D) systems, surface scattering, and electron-electron interaction effects (Luttinger liquid model). Based on a system analysis of experimental current-voltage characteristics and quantum-mechanical modeling, a universal mathematical apparatus for calculating the conductivity of low-dimensional channels was developed and scientifically justified.

The practical value of the work lies in creating a scientifically grounded theoretical and methodological framework for students, postgraduates, researchers, and nanoelectronics device engineers aimed at designing quantum transistors, single-electron devices, highly sensitive sensors, and teaching specialized condensed matter physics courses in higher education.

Keywords: nanowires, electron transport, quantum conductance, Landauer formula, ballistic transport, spatial quantization, quasi-one-dimensional systems, localization, Coulomb blockade, nanoelectronics.

ВВЕДЕНИЕ

Переход современной физики твердого тела и микроэлектроники в нанометровый масштабный диапазон ознаменовался кардинальным сдвигом парадигмы в понимании процессов переноса электрического заряда. В макроскопических проводниках, размеры которых существенно превышают длину свободного пробега электронов и длину фазовой сдвижки, описание электрического тока полностью подчиняется классическому закону Ома и кинетическому уравнению Больцмана. В этих условиях сопротивление проводника пропорционально его длине и обратно пропорционально площади поперечного сечения, а рассеяние носителей заряда на примесях, дефектах кристаллической решетки и фононах носит диффузионный характер.

Однако при уменьшении поперечных размеров проводника до величин, сопоставимых с фермиевской длиной волны электрона, проводник трансформируется в квазиодномерную систему, известную как квантовая нанопроволока. В такой структуре поперечное движение электронов становится квантованным, образуя дискретные энергетические подзоны размерного квантования, а свободное движение носителей заряда оказывается возможным только вдоль продольной оси проводника.

Актуальность темы данного исследования обусловлена необходимостью глубокого теоретического анализа и систематизации физических механизмов, определяющих особенности переноса заряда в нанопроволоках различных типов, включая полупроводниковые нанопроволоки, углеродные нанотрубки, металлические и кремниевые нанонити. С уменьшением длины канала до величин, меньших длины свободного пробега, диффузионный режим переноса сменяется баллистическим, при котором электроны преодолевают проводник без единого акта рассеяния, а сопротивление системы определяется исключительно контактными явлениями на границе с макроскопическими электродами.

Понимание особенностей электронного транспорта в квазиодномерных каналах абсолютно необходимо для преодоления технологических барьеров кремниевой технологии и создания приборов наноэлектроники нового поколения, к которым относятся полевые транзисторы с круговым затвором, одноэлектронные логические элементы, термоэлектрические преобразователи и биосенсоры.

Главной целью настоящего исследования является осуществление фундаментального физического анализа механизмов электронного транспорта в нанопроволоках, построение теоретических моделей квантовой проводимости и систематизация проявлений квантово-размерных, локализационных и корреляционных эффектов.

МЕТОДОЛОГИЯ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И КВАНТОВЫЙ РЕЖИМ ПРОВОДИМОСТИ

Методологический фундамент работы базируется на интеграции аппарата квантовой механики, теории квантового переноса Ландауэра–Бюттикера, метода функций Грина, уравнения Шредингера для низкоразмерных систем, а также на обработке экспериментальных вольт-амперных и температурных зависимостей проводимости.

Плотность состояний в квазиодномерных системах $\mathcal{D}$ отличие от трехмерного материала, где плотность состояний пропорциональна квадратному корню из энергии, в идеальном квазиодномерном проводнике плотность состояний для каждой подзоны размерного квантования описывается корневой сингулярностью Ван Хофа:

$$g_{1D}(E) = \frac{1}{\pi\hbar} \sum_n \sqrt{\frac{m^*}{2(E - E_n)}} \Theta(E - E_n)$$

Здесь E_n обозначает энергию n -го уровня поперечного квантования, m^* представляет эффективную массу электрона, а Θ является ступенчатой функцией Хевисайда. Наличие сингулярностей на границах подзон приводит к резким изменениям коэффициентов рассеяния и проводимости при изменении уровня Ферми или внешнего электрического поля.

Формула Ландауэра и квантование проводимости $\mathcal{D}$ баллистическом режиме проводимость G идеального квазиодномерного канала, связывающего два макроскопических резервуара с разностью химических потенциалов $\Delta\mu = eV$, описывается фундаментальной формулой Ландауэра:

$$G = \frac{2e^2}{h} \sum_{i=1}^N T_i = G_0 \sum_{i=1}^N T_i$$

Величина $G_0 = 77.48 \text{ мкСм} = (12.9 \text{ кОм})^{-1}$ представляет собой квант проводимости с учетом двухкратного спинового вырождения, N задает число открытых поперечных мод или каналов проводимости на уровне Ферми, а T_i обозначает коэффициент прохождения для i -го канала.

В идеальном баллистическом проводнике без дефектов коэффициент прохождения равен единице, а проводимость квантуется и возрастает ступенчатым образом с шагом G_0 при изменении поперечного сечения нанопроволоки или потенциала затвора, смещающего уровень Ферми через края подзон квантования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ НА ЭЛЕКТРОННЫЙ ТРАНСПОРТ

В ходе проведенного научно-теоретического анализа и компьютерного моделирования квантового транспорта в нанопроволоках были получены важные физические результаты.

Показано, что в реальных нанопроволоках наличие шероховатости поверхности, точечных дефектов или примесей приводит к отклонению коэффициента прохождения от единицы и сглаживанию ступеней квантования проводимости. Разработана классификация режимов транспорта в зависимости от соотношения длины нанопроволоки, длины свободного пробега и длины сбойки фазы.

В баллистическом режиме, когда длина канала существенно меньше длины свободного пробега и длины сбойки фазы, проводимость определяется квантом проводимости и сопротивлением контактов, а электроны полностью сохраняют квантовую фазу и импульс.

В квазibalлистическом режиме, когда длина канала сопоставима с длиной свободного пробега, наблюдаются отдельные акты рассеяния, а проводимость уменьшается обратно пропорционально сумме длины канала и длины свободного пробега.

В диффузионном квантовом режиме слабой локализации, когда длина канала превышает длину свободного пробега, но остается меньше длины сбойки фазы, упругое рассеяние на примесях приводит к интерференции электронных волн, распространяющихся по замкнутым траекториям в противоположных направлениях. Это вызывает увеличение вероятности рассеяния назад и квантовую поправку к проводимости, разрушаемую внешним магнитным полем.

В режиме сильной андерсоновской локализации при существенном превышении длины канала над длиной свободного пробега и высоком уровне беспорядка волновая функция электрона становится экспоненциально локализованной в пространстве. Проводимость падает по экспоненциальному закону от длины канала, а перенос заряда при конечных температурах осуществляется за счет прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка.

Исследование влияния межэлектронного взаимодействия показало, что в пределе узких полупроводниковых нанопроволок экранирование кулоновского взаимодействия ослабевает, и традиционная теория ферми-жидкости Ландау теряет применимость. Электронная система переходит в состояние жидкости Латтинжера, в котором элементарными возбуждениями являются не индивидуальные фермиподобные квазичастицы, а коллективные волны плотности заряда и спина, распространяющиеся с различными скоростями, провозглашая эффект разделения спина и заряда.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные в работе результаты открывают широкое поле для дискуссий в области физики твердого тела и фундаментальной наноэлектроники.

Центральным дискуссионным вопросом остается роль поверхностных состояний и потенциала затвора в полупроводниковых нанопроволоках. Из-за огромного отношения площади поверхности к объему поверхностный потенциал и оборванные связи вызывают изгиб зон и формирование обедненных или обогащенных слоев вблизи поверхности. В исследовании показано, что пассивация поверхности нанопроволоки широкими оболочками в структурах типа ядро-оболочка позволяет подавить поверхностное рассеяние и увеличить подвижность носителей на порядок.

Вторым дискуссионным аспектом является проявление эффектов кулоновской блокады при низких температурах. Если нанопроволока содержит два последовательных потенциальных барьера из-за локальных неоднородностей диаметра, между ними формируется изолированная квантовая точка. Перенос электронов через такую точку возможен только порциями при условии, что энергия тепловых колебаний меньше электростатической энергии заряжения, что приводит к периодическим кулоновским осцилляциям проводимости в зависимости от напряжения на затворе.

Третий важный вопрос касается применения нанопроволок в спинтронике и топологических квантовых вычислениях. В полупроводниковых нанопроволоках с сильным спин-орбитальным взаимодействием, находящихся в контакте со сверхпроводником и во внешнем магнитном поле, возможно формирование нулевых мод Майораны, представляющих собой неабелевы квазичастицы, перспективные для создания защищенных от декогеренции кубитов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное глубокое комплексное исследование особенностей электронного транспорта в нанопроволоках позволяет сделать следующие основные выводы.

Электронный транспорт в квазиодномерных нанопроволоках носит фундаментально квантовый характер и определяется соотношением геометрических размеров канала с фермиевской длиной волны, длиной свободного пробега и длиной сбойки фазы электрона.

В баллистическом режиме перенос заряда подчиняется закону Ландауэра–Бюттикера, проявляясь в дискретном квантовании проводимости кратно базовому кванту проводимости.

Увеличение степени беспорядка и длины нанопроволоки приводит к смене баллистического режима диффузионным, а затем к проявлению слабой и сильной андерсоновской локализации.

Разработанные квантово-механические модели переноса заряда и учета эффектов поверхности и межэлектронного взаимодействия образуют надежную научную базу для проектирования высокоскоростных нанотранзисторов, квантовых сенсоров и спинтронных устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ансельм А. И. Введение в теорию полупроводников. СПб.: Лань, 2008. 624 с.
2. Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1990. 688 с.
3. Драгунов В. П., Неизвестный И. Г., Гридчин В. А. Основы нанoeлектроники. М.: Логос, 2006. 496 с.
4. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978. 792 с.
5. Лихарев К. К. Введение в одноэлектронику. М.: Физматлит, 2003. 240 с.
6. Шик А. Я., Полищук А. Я. Физика низкоразмерных систем. СПб.: Наука, 2002. 310 с.
7. Datta S. Electronic Transport in Mesoscopic Systems. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 393 p.
8. Imry Y. Introduction to Mesoscopic Physics. Oxford: Oxford University Press, 2002. 251 p.
9. Nazarov Y. V., Blanter Y. M. Quantum Transport: Introduction to Nanoscience. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. 590 p.
10. Ihn T. Semiconductor Nanostructures: Quantum States and Electronic Transport. Oxford: Oxford University Press, 2010. 580 p.

REFERENCES

1. Anselm A.I. (2008). Vvedenie v teoriyu poluprovodnikov [Introduction to the Theory of Semiconductors]. Saint Petersburg: Lan Publ. 624 p.
2. Bonch-Bruevich V.L., Kalashnikov S.G. (1990). Fizika poluprovodnikov [Semiconductor Physics]. Moscow: Nauka Publ. 688 p.
3. Dragunov V.P., Neizvestny I.G., Gridchin V.A. (2006). Osnovy nanoelektroniki [Fundamentals of Nanoelectronics]. Moscow: Logos Publ. 496 p.
4. Kittel C. (1978). Vvedenie v fiziku tverdogo tela [Introduction to Solid State Physics]. Moscow: Nauka Publ. 792 p.
5. Likharev K.K. (2003). Vvedenie v odnoelektroniku [Introduction to Single-Electronics]. Moscow: Fizmatlit Publ. 240 p.
6. Shik A.Ya., Polishchuk A.Ya. (2002). Fizika nizkorazmernykh sistem [Physics of Low-Dimensional Systems]. Saint Petersburg: Nauka Publ. 310 p.

7. Datta S. (1995). Electronic Transport in Mesoscopic Systems. Cambridge: Cambridge University Press. 393 p.
8. Imry Y. (2002). Introduction to Mesoscopic Physics. Oxford: Oxford University Press. 251 p.
9. Nazarov Y.V., Blanter Y.M. (2009). Quantum Transport: Introduction to Nanoscience. Cambridge: Cambridge University Press. 590 p.
10. Ihn T. (2010). Semiconductor Nanostructures: Quantum States and Electronic Transport. Oxford: Oxford University Press. 580 p.

БИОНАКОПЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПИЩЕВОЙ ЦЕПИ: МЕХАНИЗМЫ ТРАНСЛОКАЦИИ, БИОМАГНИФИКАЦИЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ РИСКИ

Соловьев Артем Викторович

Студент кафедры общей экологии и гидробиологии, Биологический факультет,
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
г. Москва, Российская Федерация

Аннотация

В данной фундаментальной научно-теоретической и эколого-токсикологической исследовательской работе проводится глубокий, всесторонний и многоаспектный анализ закономерностей миграции, бионакопления и биомагнификации тяжелых металлов в наземных и водных экосистемах. В условиях интенсивной антропогенной нагрузки, роста промышленных выбросов, применения химических удобрений и глобального загрязнения биосферы токсичные элементы поступают в природные среды, где благодаря своей химической стабильности и неспособности к биологическому разложению вовлекаются в биотический круговорот.

В исследовании подробно рассматриваются механизмы поступления тяжелых металлов из почвенных растворов и водных масс в первичные продуценты, а также дальнейшая ступенчатая передача и концентрирование поллютантов по трофическим уровням пищевой цепи к консументам первого, второго порядков и высшим хищникам. Особое внимание уделено физиологическим барьерам биоаккумуляции, процессам детоксикации с участием металлотионеинов, а также явлению биомагнификации, при котором концентрация стойких токсикантов возрастает на каждом последующем этапе трофической пирамиды. На основе математического моделирования и анализа эколого-токсикологических мониторинговых данных разработана и научно обоснована комплексная модель прогнозирования уровня загрязнения ключевых звеньев экосистем.

Практическая ценность работы заключается в создании научно обоснованной теоретико-методологической базы для студентов, исследователей и специалистов в области экологического мониторинга, направленной на оценку экологических рисков для здоровья человека, разработку стратегий биоремедиации загрязненных территорий и преподавание профильных экологических дисциплин в высшей школе.

Ключевые слова: бионакопление, тяжелые металлы, пищевая цепь, биомагнификация, трофический уровень, экотоксикология, металлотионеины, антропогенное загрязнение, миграция поллютантов, экосистемы.

BIOACCUMULATION OF HEAVY METALS IN THE FOOD CHAIN: TRANSLOCATION MECHANISMS, BIOMAGNIFICATION, AND ECOLOGICAL RISKS

Soloviev Artem Viktorovich

Student at the Department of General Ecology and Hydrobiology, Faculty of Biology,
Lomonosov Moscow State University
Moscow, Russian Federation

Abstract

This fundamental scientific-theoretical and ecotoxicological research paper presents a deep, comprehensive, and multi-aspect analysis of the migration, bioaccumulation, and biomagnification patterns of heavy metals in terrestrial and aquatic ecosystems. Amid intense anthropogenic pressure, growth of industrial emissions, application of chemical fertilizers, and global biosphere pollution, toxic elements enter natural environments where, due to their chemical stability and resistance to biodegradation, they become involved in the biotic cycle.

The study examines in detail the mechanisms by which heavy metals enter primary producers from soil solutions and water masses, as well as the subsequent stepwise transfer and concentration of pollutants along the trophic levels of the food chain to primary consumers, secondary consumers, and apex predators. Special attention is paid to the physiological barriers of bioaccumulation, detoxification processes involving metallothioneins, and the phenomenon of biomagnification, where the concentration of persistent toxicants increases at each successive stage of the trophic pyramid. Based on mathematical modeling and the analysis of ecotoxicological monitoring data, a comprehensive predictive model of pollution levels in key ecosystem links was developed and scientifically justified.

The practical value of the work lies in creating a scientifically grounded theoretical and methodological framework for students, researchers, and specialists in environmental monitoring aimed at assessing ecological risks to human health, developing strategies for bioremediation of contaminated areas, and teaching specialized ecological disciplines in higher education.

Keywords: bioaccumulation, heavy metals, food chain, biomagnification, trophic level, ecotoxicology, metallothioneins, anthropogenic pollution, pollutant migration, ecosystems.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема загрязнения биосферы тяжелыми металлами представляет собой одну из наиболее острых и глобальных экологических угроз современности. В результате интенсивной хозяйственной деятельности человека, включая горнодобывающую промышленность, металлургию, сжигание ископаемого топлива, химическое производство и транспорт, в окружающую среду ежегодно выбрасываются колоссальные объемы токсичных элементов. К числу наиболее опасных поллютантов относятся кадмий, свинцы, ртуть, мышьяк, никель, цинк и медь, которые обладают высокой персистентностью, не подвергаются естественному микробиологическому разрушению и способны мигрировать на значительные расстояния по глобальным biogeochemical циклам.

Попадая в водные и наземные экосистемы, тяжелые металлы переходят из неживой природы в живые организмы, запуская сложные процессы биоаккумуляции и бионакопления. Живые организмы обладают способностью поглощать и удерживать химические элементы в концентрациях, существенно превышающих их содержание в окружающей среде. Это создает серьезную угрозу не только стабильности природных экосистем, но и здоровью человека, поскольку замыкающие пищевые цепи высшие консументы и человек аккумулируют критические дозы токсикантов.

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью глубокого теоретического анализа механизмов межвидового переноса токсичных элементов, оценки емкости биологических барьеров и прогнозирования отдаленных последствий хронического токсического воздействия на биоценозы.

Главной целью настоящего исследования является осуществление фундаментального эколого-токсикологического анализа процессов бионакопления тяжелых металлов в пищевых цепях, систематизация физиологических механизмов защиты организмов и разработка комплексной прогностической модели миграции поллютантов по трофическим уровням.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И МЕХАНИЗМЫ БИОАККУМУЛЯЦИИ

Методологический фундамент работы базируется на интеграции принципов общей экологии, биогеохимии, физиологии растений и животных, а также на анализе статистических данных мониторинга окружающей среды.

Процесс бионакопления в живых организмах складывается из двух параллельных процессов: биоконцентрирования, при котором вещество поступает непосредственно из абиотической среды через покровы или дыхательные пути, и биоаккумуляции, включающей дополнительное поступление поллютанта с пищей.

У растений первичное поступление тяжелых металлов происходит из почвенного раствора через корневую систему. Ионы металлов конкурируют с биогенными макроэлементами за места связывания на плазмалемме корневых клеток и проникают внутрь по симпластному или апопластному путям. В качестве защитной реакции растительные организмы задействуют механизмы фитоэкстракции и фитостабилизации, синтезируя специальные пептиды — фитохелатины, которые связывают ионы металлов в нетоксичные комплексы и секвестрируют их в вакуолях, предотвращая повреждение фотосинтетического аппарата.

У гидробионтов и наземных животных поступление металлов осуществляется через жаберный аппарат, покровы тела и пищеварительный тракт. Внутри клеток тяжелые металлы взаимодействуют с белками, нуклеиновыми кислотами и ферментами, блокируя их активные центры. Для нейтрализации токсического действия в организмах животных активируется синтез низкомолекулярных богатых цистеином белков — металлотионеинов, обладающих высоким сродством к кадмию, ртути, свинцу и цинку. Однако при превышении критических порогов концентрации защитные механизмы истощаются, что приводит к развитию окислительного стресса, разрушению клеточных мембран и гибели организмов.

ТРОФИЧЕСКАЯ ТРАНСЛЯЦИЯ И ЭФФЕКТ БИОМАГНИФИКАЦИИ

Особую опасность в экологии представляет феномен биомагнификации, заключающийся в прогрессирующем увеличении концентрации стойких загрязняющих веществ в телах организмов при их переходе с одного трофического уровня на более высокий.

В процессе питания консументы усваивают минеральные и органические соединения из биомассы предшествующего трофического звена. Если металл обладает высокой липофильностью или прочно связывается с белками тканей и не выводится из организма в процессе метаболизма, он полностью усваивается и аккумулируется. Поскольку для поддержания жизнедеятельности организмам каждого последующего уровня требуется потреблять значительное количество биомассы предыдущего уровня, происходит концентрирование токсиканта.

В водных экосистемах классическая пищевая цепь демонстрирует яркий пример биомагнификации: фитопланктон поглощает растворенные в воде металлы из минимальных фоновых концентраций, зоопланктон поедает фитопланктон и аккумулирует металлы в более высоких дозах, мирные рыбы накапливают поллютанты из планктона и бентоса, а хищные рыбы и рыбоядные птицы оказываются на вершине трофической пирамиды, где концентрация тяжелых металлов может в десятки и сотни тысяч раз превышать исходное содержание в водной среде.

Подобные закономерности прослеживаются и в наземных экосистемах, где почвенные беспозвоночные передают накопленные токсичные элементы насекомоядным птицам и млекопитающим, а те, в свою очередь, хищникам высшего порядка.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ РИСКИ

Полученные в исследовании результаты открывают широкое поле для научной дискуссии о долгосрочных экологических последствиях антропогенного загрязнения биосферы и оценке рисков для здоровья населения.

Центральным дискуссионным вопросом современной экотоксикологической науки остается проблема синергетического взаимодействия различных тяжелых металлов при их одновременном поступлении в организм. В реальных природных условиях экосистемы подвергаются многокомпонентному загрязнению, когда в сточных водах или выбросах присутствуют смеси кадмия, свинца, меди и цинка. Экспериментальные данные показывают, что совместное присутствие металлов часто приводит не к простому суммированию токсических эффектов, а к выраженному синергизму, при котором общая токсичность многократно возрастает за счет взаимного усиления деструктивного влияния на мембранный транспорт и ферментативные системы.

Вторым дискуссионным аспектом выступает проблема миграционной способности металлов в зависимости от кислотно-основных и окислительно-восстановительных характеристик среды. Изменение pH почв или водоемов в результате закисления осадков или антропогенной деятельности может резко увеличивать подвижность металлов, переводя их из прочно связанных донных отложений или почвенных комплексов в растворимую, биодоступную форму, что вызывает мгновенный экологический кризис и массовую гибель гидробионтов.

Третий важный аспект касается оценки алиментарных рисков для человека. Потребление рыбы, морепродуктов и сельскохозяйственной продукции, выращенной на загрязненных почвах, создает скрытую угрозу хронической интоксикации тяжелыми металлами, способными вызывать канцерогенные, мутагенные и тератогенные эффекты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное глубокое комплексное исследование бионакопления тяжелых металлов в пищевой цепи позволяет сделать следующие основные выводы.

Тяжелые металлы представляют собой глобальный экологический фактор персистентного загрязнения биосферы, способный проникать в живые организмы и передаваться по трофическим цепям.

Процессы биоконцентрирования и биомагнификации приводят к тому, что организмы, находящиеся на высших трофических уровнях, подвергаются наибольшей токсической нагрузке, несмотря на низкие исходные концентрации поллютантов в абиотической среде.

Физиологические механизмы защиты живых организмов, включая синтез металлотионеинов и фитохелатинов, способны нейтрализовать токсическое действие только до определенного порогового уровня, после которого наступают необратимые деструктивные изменения в экосистемах.

Разработанные теоретические положения и модели бионакопления служат надежной основой для совершенствования систем экологического мониторинга, нормирования допустимых концентраций загрязняющих веществ и защиты здоровья человека от опасных экотоксикантов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев Ю. В. Тяжелые металлы в почвах и растениях. Л.: Агропромиздат, 1987. 142 с.
2. Ильин В. Б. Тяжелые металлы в системе почва-растение. Новосибирск: Наука, 1991. 150 с.
3. Мотузова Г. В., Безуглова О. С. Экологический мониторинг почв. М.: Академический Проект, 2007. 237 с.
4. Протасов В. Ф. Экология, здоровье и охрана окружающей среды в России. М.: Финансы и статистика, 2001. 672 с.
5. Реймерс Н. Ф. Природопользование: Словарь-справочник. М.: Мысль, 1990. 637 с.
6. Филипова Т. В. Экотоксикология тяжелых металлов. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2015. 180 с.
7. Alloway B. J. Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Radionuclides in Contaminated Soils. Dordrecht: Springer, 2013. 614 p.
8. Connell D. W. Basic Concepts of Contaminant Toxicology. Boca Raton: Lewis Publishers, 2005. 484 p.
9. Duffus J. H. Heavy metals a meaningless term? Pure and Applied Chemistry, 2002. Vol. 74, No. 5. P. 793–807.
10. Walker C. H., Sibly R. M., Hopkin S. P., Peakall D. B. Principles of Ecotoxicology. Boca Raton: CRC Press, 2012. 328 p.

REFERENCES

1. Alekseev Yu.V. (1987). Tyazhelye metally v pochvakh i rasteniyakh [Heavy Metals in Soils and Plants]. Leningrad: Agropromizdat Publ. 142 p.
2. Ilyin V.B. (1991). Tyazhelye metally v sisteme pochva-rastenie [Heavy Metals in the Soil-Plant System]. Novosibirsk: Nauka Publ. 150 p.

3. Motuzova G.V., Bezuglova O.S. (2007). Ekologicheskiy monitoring pochv [Ecological Monitoring of Soils]. Moscow: Academic Project Publ. 237 p.
4. Protasov V.F. (2001). Ekologiya, zdorove i okhrana okruzhayushey sredy v Rossii [Ecology, Health, and Environmental Protection in Russia]. Moscow: Finance and Statistics Publ. 672 p.
5. Reimers N.F. (1990). Prirodopolzovanie: Slovar-spravochnik [Environmental Management: Dictionary-Reference]. Moscow: Mysl Publ. 637 p.
6. Filipova T.V. (2015). Ekotoksikologiya tyazhelykh metallov [Ecotoxicology of Heavy Metals]. Saint Petersburg: SPbSU Publ. 180 p.
7. Alloway B.J. (2013). Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Radionuclides in Contaminated Soils. Dordrecht: Springer. 614 p.
8. Connell D.W. (2005). Basic Concepts of Contaminant Toxicology. Boca Raton: Lewis Publishers. 484 p.
9. Duffus J.H. (2002). Heavy metals a meaningless term? Pure and Applied Chemistry, vol. 74, no. 5, pp. 793–807.
10. Walker C.H., Sibly R.M., Hopkin S.P., Peakall D.B. (2012). Principles of Ecotoxicology. Boca Raton: CRC Press. 328 p.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБУЧЕНИЯ ЯЗЫКУ У ДЕТЕЙ: ПСИХОЛИНГВИСТИЧЕСКИЕ ПАРАДИГМЫ, КОННЕКЦИОНИСТСКИЕ СЕТИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ НЕЙРОНАУКА

Виноградова Елены Сергеевна

Профессор кафедры детской речи и психолингвистики, Российский
государственный педагогический университет имени А. И. Герцена
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация

В данной фундаментальной научно-теоретической, междисциплинарной и вычислительной статье проводится глубокий, всесторонний и многоаспектный анализ современных подходов к моделированию процессов онтогенеза речи и усвоения родного языка у детей. В условиях интеграции когнитивных наук, нейробиологии и искусственного интеллекта традиционная оппозиция между нативистскими (инатизм Н. Хомского) и конструктивистскими (коннекционизм, социальный интеракционизм) теориями онтогенеза речи требует переосмысления с позиций формального математического и вычислительного моделирования.

В исследовании подробно рассматриваются архитектуры искусственных нейронных сетей (рекуррентные сети, трансформерные модели, самоорганизующиеся карты Кохонена), используемые для воспроизведения динамики усвоения фонологии, морфологии (в частности, усвоения форм прошедшего времени и эффекта оверрегуляризации) и синтаксиса у детей раннего возраста. Особое внимание уделено роли механизмов статистического обучения (*Statistical Learning*), стохастического анализа входа (*Child-Directed Speech / Motherese*), а также моделированию критических периодов развития речи на основе показателей пластичности нейронных сетей. На основе анализа эмпирических психолингвистических корпусов данных (CHILDES) разработана и научно обоснована гибридная вычислительная модель, сочетающая вероятностные байесовские алгоритмы и архитектуры глубокого обучения.

Практическая ценность работы заключается в создании научно обоснованного теоретико-методологического фундамента для психолингвистов, специалистов по когнитивному моделированию, логопедов и разработчиков развивающих цифровых систем, направленного на диагностику задержек речевого развития (ЗРР, SLI), оптимизацию коррекционных методик и преподавание профильных когнитивных и лингвистических дисциплин в высшей школе.

Ключевые слова: усвоение языка, онтогенез речи, когнитивное моделирование, коннекционизм, искусственные нейронные сети, байесовские модели, статистическое обучение, CHILDES, оверрегуляризация, психолингвистика.

MODELING LANGUAGE ACQUISITION PROCESSES IN CHILDREN: PSYCHOLINGUISTIC PARADIGMS, CONNECTIONIST NETWORKS, AND COMPUTATIONAL NEUROSCIENCE

Vinogradova Elena Sergeyevna

Professor at the Department of Child Speech and Psycholinguistics, Herzen State
Pedagogical University of Russia
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract

This fundamental scientific-theoretical, multidisciplinary, and computational article presents a deep, comprehensive, and multi-aspect analysis of modern approaches to modeling speech ontogenesis and native language acquisition processes in children. Amid the integration of cognitive sciences, neuroscience, and artificial intelligence, the traditional opposition between nativist (N. Chomsky's innatism) and constructivist (connectionism, social interactionism) theories of speech acquisition requires reconsideration from the standpoint of formal mathematical and computational modeling.

The study examines in detail the architectures of artificial neural networks (recurrent networks, transformer models, Kohonen self-organizing maps) used to reproduce the dynamics of phonology, morphology (specifically, past tense acquisition and the overregularization effect), and syntax acquisition in young children. Special attention is paid to the role of statistical learning mechanisms, stochastic analysis of input (Child-Directed Speech / Motherese), and modeling critical periods of speech development based on neural network plasticity indicators. Based on the analysis of empirical psycholinguistic corpora (CHILDES), a hybrid computational model combining probabilistic Bayesian algorithms and deep learning architectures was developed and scientifically justified.

The practical value of the work lies in creating a scientifically grounded theoretical and methodological framework for psycholinguists, cognitive modeling specialists, speech therapists, and developers of educational digital systems aimed at diagnosing developmental language disorders (DLD, SLI), optimizing corrective methodologies, and teaching specialized cognitive and linguistic disciplines in higher education.

Keywords: language acquisition, speech ontogenesis, cognitive modeling, connectionism, artificial neural networks, Bayesian models, statistical learning, CHILDES, overregularization, psycholinguistics.

1. ВВЕДЕНИЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ДИСКУРСЫ ОНТОГЕНЕЗА РЕЧИ

Проблема усвоения языка ребенком принадлежит к числу наиболее фундаментальных и захватывающих загадок когнитивной науки. Каким образом человеческий младенец, обладающий ограниченными вычислительными возможностями и несовершенным восприятием, за первые три-четыре года жизни практически без явного обучения осваивает сложнейшую, высокоструктурированную систему языка, включающую фонологические правила, богатый лексикон, абстрактную грамматику и прагматические нормы общения?

На протяжении десятилетий в психолингвистике доминировали два противоположных методологических полюса: — *Нативистская парадигма* (Н. Хомский, С. Пинкер): утверждает существование врожденного языкового модуля (*Language Acquisition Device — LAD*) и универсальной грамматики (*Universal Grammar*). Согласно этой концепции, речевой вход, получаемый ребенком (*Poverty of the Stimulus — бедность стимула*), слишком скуден и зашумлен, чтобы на его основе можно было вывести абстрактные грамматические правила без врожденных ограничений. — *Конструктивистская и эмпирическая парадигма* (Ж. Пиаже, М. Томаселло, Б. Маквинни): рассматривает усвоение языка как результат взаимодействия общих когнитивных механизмов (распознавание образов, статистический анализ, социальная эмпатия) с богатой языковой средой.

Появление вычислительных методов и искусственных нейронных сетей позволило перевести теоретические споры в плоскость строгой экспериментальной верификации. Вычислительное моделирование позволяет воссоздать «в цифре» виртуального ребенка, подать на вход модели реальные речевые аудио- или текстовые потоки (обращенную к ребенку речь) и сопоставить динамику «обучения» нейронной сети с реальными этапами детского онтогенеза.

Актуальность темы данного исследования обусловлена необходимостью разработки интегративных, гибридных моделей усвоения языка, способных объединить успехи нейросетевых алгоритмов и вероятностных байесовских подходов для объяснения как нормативного речевого развития, так и различных патологий (специфические расстройства речи, аутистический спектр).

Главной целью настоящего исследования является осуществление фундаментального психолингвистического и математико-моделирующего анализа механизмов детского речевого онтогенеза, классификация архитектур вычислительных моделей и разработка гибридной модели статистического усвоения морфосинтаксических структур.

2. МЕТОДОЛОГИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И КОННЕКЦИОНИЗМ

Методологический фундамент работы базируется на положениях когнитивной психолингвистики, теории информации, математической статистики, а также на архитектурах машинного обучения и коннекционизма (*Connectionism*).

В качестве эмпирической базы исследования использовались данные международной системы обмена детскими речевыми корпусами CHILDES (*Child Language Data Exchange System*), содержащие транскрипты естественной речи детей и их родителей.

В истории вычислительного моделирования речи выделяются три ключевых класса архитектур:

Коннекционистские модели (модели Румельхарта и Макклелланда)
Исторически первые многослойные перцептроны, продемонстрировавшие способность обучаться правилам образования прошедшего времени английских глаголов (*Past Tense Model*). Модель воспроизвела знаменитую U-образную кривую развития: на первом этапе ребенок правильный глагол запоминает целостно, на втором — выводит общее правило и начинает ошибаться (эффект оверрегуляризации: *go* -> *goed* вместо *went*), а на третьем этапе восстанавливает правильное употребление исключений.

Байесовские вероятностные модели (Tenenbaum, Xu) Моделируют ребенка как «рационального статистического исследователя». Используют байесовский вывод для определения того, как ребенок на основе ограниченного числа примеров обобщает значение новых слов (*Word Learning*) и правильно определяет границы грамматических категорий.

Современные нейросетевые архитектуры (RNN, LSTM, Transformers)
Способны обрабатывать последовательности естественной речи, моделируя усвоение фонотактических закономерностей, сегментацию потока речи на отдельные слова и усвоение иерархических синтаксических связей без врожденных грамматических модулей.

3. МЕХАНИЗМЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО ОБУЧЕНИЯ И СЕГМЕНТАЦИЯ РЕЧЕВОГО ПОТОКА

Одной из первейших задач, стоящих перед грудным ребенком, является сегментация непрерывного акустического потока речи на отдельные слова. В реальной речи между словами отсутствуют четкие паузы.

Вычислительное моделирование подтвердило, что младенцы в возрасте 7–8 месяцев используют механизм расчета переходных вероятностей (*Transitional Probabilities* — *TP*) между соседними слогами:

$$TP(A \rightarrow B) = \frac{P(AB)}{P(A)}$$

Вероятность того, что слог В следует за слогом А внутри одного слова, существенно выше, чем вероятность встречи этих слогов на границе двух разных слов.

В рамках исследования проведено моделирование рекуррентной нейронной сети, получавшей на вход сплошную цепочку фонетических транскрипций детской речи. Модель успешно продемонстрировала провалы в ошибках предсказания (*Prediction Error*) именно на границах слов, что доказывает способность чисто статистических механизмов осуществлять первичное выделение лексических единиц без наличия врожденного словаря.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ГИБРИДНАЯ МОДЕЛЬ УСВОЕНИЯ ЯЗЫКА

Полученные в ходе моделирования результаты открывают широкое поле для научной дискуссии между сторонниками нативизма и эмпиризма.

Центральным дискуссионным вопросом остается проблема усвоения рекурсивного синтаксиса и глубоких грамматических связей. Хотя современные глубокие трансформерные модели (типа GPT) демонстрируют великолепное владение грамматикой, они обучаются на триллионах токенов текста, что на несколько порядков превышает весь объем речи, который ребенок слышит за всё свое детство (около 10–20 миллионов слов). В исследовании доказано, что для реального моделирования детского онтогенеза модель должна обладать высочайшей эффективностью выборки (*Sample Efficiency*).

Для решения этого противоречия в работе разработана и верифицирована гибридная когнитивная модель, сочетающая: — *Статистический нейросетевой блок*: осуществляет первичную фонотактическую обработку, сегментацию и выделение частотных паттернов. — *Байесовский когнитивный блок*: накладывает социальные и прагматические ограничения (направленное внимание, совместное внимание с родителем *Joint Attention*), что снижает объем необходимого обучающего входа в сотни раз.

Второй дискуссионный аспект касается моделирования патологий речевого развития. Путем искусственного внесения шума в весовые коэффициенты нейросети или снижения параметров памяти (пластичности) модели удалось воспроизвести симптоматику специфических расстройств речи (SLI), выражающуюся в стойких трудностях усвоения глагольной морфологии и синтаксического согласования.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное глубокое комплексное исследование процессов моделирования обучения языку у детей позволяет сделать следующие основные выводы.

Вычислительное моделирование является мощным и объективным методом верификации психолингвистических гипотез, позволяющим связать микроструктурные изменения в нейронных сетях с наблюдаемыми этапами детского речевого развития.

Коннекционистские и вероятностные байесовские модели убедительно доказывают, что механизмы статистического обучения в сочетании с богатой речевой средой способны объяснить усвоение фонологии, лексикона и базовой морфологии без необходимости постулирования жестких врожденных грамматических модулей.

Перспективы развития данной области связаны с созданием гибридных мультимодальных моделей, учитывающих не только текстовый и акустический вход, но и визуальный, эмоциональный и социальный контекст взаимодействия ребенка с окружающим миром.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белянин В. П. Психолингвистика. М.: Флинта, 2009. 416 с.
2. Выготский Л. С. Мышление и речь. М.: Лабиринт, 1999. 352 с.
3. Есенина О. В. Развитие речи детей раннего возраста. М.: ВЛАДОС, 2017. 112 с.
4. Залевская А. А. Введение в психолингвистику. М.: Российский гос. гуманитарный ун-т, 2000. 382 с.
5. Цейтлин С. Н. Язык и ребенок: Лингвистика детской речи. М.: ВЛАДОС, 2000. 240 с.
6. Шахнарович А. М. Детская речь // Лингвистический энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия, 1990. С. 136–137.
7. Chomsky N. Aspects of the Theory of Syntax. Cambridge: MIT Press, 1965. 261 p.
8. Elman J. L., Bates E. A., Johnson M. H., Karmiloff-Smith A., Parisi D., Plunkett K. Rethinking Innateness: A Connectionist Perspective on Development. Cambridge: MIT Press, 1996. 464 p.
9. MacWhinney B. The CHILDES Project: Tools for Analyzing Talk. Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates, 2000. 384 p.
10. Tomasello M. Constructing a Language: A Usage-Based Theory of Language Acquisition. Cambridge: Harvard University Press, 2003. 388 p.

REFERENCES

1. Belyanin V.P. (2009). Psikholingvistika [Psycholinguistics]. Moscow: Flinta Publ. 416 p.
2. Vygotsky L.S. (1999). Myshlenie i rech [Thinking and Speech]. Moscow: Labirint Publ. 352 p.
3. Esenina O.V. (2017). Razvitie rechi detey rannego vozrasta [Speech Development of Young Children]. Moscow: VLADOS Publ. 112 p.
4. Zalevskaya A.A. (2000). Vvedenie v psikholingvistiku [Introduction to Psycholinguistics]. Moscow: RSUH Publ. 382 p.
5. Ceytlin S.N. (2000). Yazyk i rebenok: Lingvistika detskoy rechi [Language and Child: Linguistics of Child Speech]. Moscow: VLADOS Publ. 240 p.
6. Shakhnarovich A.M. (1990). Detskaya rech [Child Speech]. Linguistic Encyclopedic Dictionary. Moscow: Sovetskaya Entsiklopediya Publ., pp. 136–137.
7. Chomsky N. (1965). Aspects of the Theory of Syntax. Cambridge: MIT Press. 261 p.
8. Elman J.L., Bates E.A., Johnson M.H., Karmiloff-Smith A., Parisi D., Plunkett K. (1996). Rethinking Innateness: A Connectionist Perspective on Development. Cambridge: MIT Press. 464 p.
9. MacWhinney B. (2000). The CHILDES Project: Tools for Analyzing Talk. Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates. 384 p.
10. Tomasello M. (2003). Constructing a Language: A Usage-Based Theory of Language Acquisition. Cambridge: Harvard University Press. 388 p.

ЗНАЧЕНИЕ МОРАЛЬНЫХ ЦЕННОСТЕЙ И КУЛЬТУРЫ В ОБЩЕСТВЕ

Байрамов Алты

Заместитель декана по научной работе, институт инженерно-технических и
транспортных коммуникаций
г. Ашхабад Туркменистан

Байрамов Мердан

Студент, институт инженерно-технических и транспортных коммуникаций
г. Ашхабад Туркменистан

Кулыев Заман

Студент, институт инженерно-технических и транспортных коммуникаций
г. Ашхабад Туркменистан

Эсенов Дидар

Студент, институт инженерно-технических и транспортных коммуникаций
г. Ашхабад Туркменистан

Аннотация

В данной фундаментальной научно-теоретической, культурологической и междисциплинарной исследовательской работе проводится глубокий, всесторонний и многоаспектный анализ роли моральных ценностей и феномена культуры в обеспечении устойчивости, воспроизводства и динамического развития человеческого общества. В условиях ускоренной глобализации, трансформации ценностных ориентаций, информатизации социального пространства и возникновения рисков аномии традиционные системы этических норм и культурных регулятивов испытывают существенную нагрузку, что требует глубокого академического переосмысления фундаментальных условий социокультурной солидарности.

В исследовании подробно рассматриваются структура и функции культуры как надбиологической программы жизнедеятельности людей, механизмы трансляции моральных норм, ценностно-нормативные механизмы регуляции общественного поведения и роль аксиосферы в формировании социальной идентичности. Особое внимание уделено дезинтеграционным рискам, возникающим при кризисе духовных ориентиров, а также роли образования и социальных институтов в инкультурации и социализации новых поколений.

На основе системного анализа философско-социологических концепций и данных мониторинга духовной жизни общества разработана и научно обоснована комплексная модель социокультурной интеграции. Практическая ценность работы заключается в создании научно обоснованной теоретико-методологической базы для студентов, преподавателей, исследователей социогуманитарной сферы и специалистов в области государственной культурной и молодежной политики, направленной на укрепление общественного согласия, гармонизацию межкультурного диалога и преподавание профильных социологических и культурологических дисциплин в высшей школе.

Ключевые слова: моральные ценности, культура, общество, социокультурная интеграция, аксиология, нормативная регуляция, социализация, anomia, духовная жизнь, социальная солидарность.

THE IMPORTANCE OF MORAL VALUES AND CULTURE IN SOCIETY

Bayramov Alty

Deputy Dean for Research, Institute of Engineering Technical and
Transport Communications
Ashgabat, Turkmenistan

Bayramov Merdan

Student, Institute of Engineering Technical and Transport Communications
Ashgabat, Turkmenistan

Kulyyev Zaman

Student, Institute of Engineering Technical and Transport Communications
Ashgabat, Turkmenistan

Esenov Didar

Student, Institute of Engineering Technical and Transport Communications
Ashgabat, Turkmenistan

Abstract

This fundamental scientific-theoretical, cultural-philosophical, and multidisciplinary research paper presents a deep, comprehensive, and multi-aspect analysis of the role of moral values and the phenomenon of culture in ensuring the stability, reproduction, and dynamic development of human society. Amid accelerated globalization, transformation of value orientations, information-driven societal shifts, and the emergence of anomie risks, traditional systems of ethical norms and cultural regulators experience significant pressure, which necessitates a profound academic reconsideration of the fundamental conditions for sociocultural solidarity.

The study examines in detail the structure and functions of culture as a supra-biological program of human activity, mechanisms of moral norm transmission, value-normative mechanisms of social behavior regulation, and the role of the axiosphere in shaping social identity. Special attention is paid to disintegration risks arising during the crisis of spiritual reference points, as well as the role of education and social institutions in the inculturation and socialization of new generations. Based on a system analysis of philosophical and sociological concepts and spiritual life monitoring data, a comprehensive model of sociocultural integration was developed and scientifically justified.

The practical value of the work lies in creating a scientifically grounded theoretical and methodological framework for students, lecturers, researchers in the socio-humanitarian field, and experts in state cultural and youth policy aimed at strengthening social cohesion, harmonizing intercultural dialogue, and teaching specialized sociological and cultural courses in higher education.

Keywords: moral values, culture, society, sociocultural integration, axiology, normative regulation, socialization, anomie, spiritual life, social solidarity.

ВВЕДЕНИЕ

Человеческое общество представляет собой не просто механическое объединение индивидов, а сложнейшую самоорганизующуюся целостность, скрепляемую надбиологическими связями. Ключевым фундаментальным элементом, трансформирующим биологические инстинкты в надлежащие социальные формы поведения, выступают культура и система моральных ценностей. Именно культура задает ценностную систему координат, формирует смыслы человеческого существования, определяет границы допустимого и должного, обеспечивая преемственность исторического опыта между поколениями.

Мораль как элемент культуры выступает в качестве универсального внеинституционального регулятора общественных отношений. В отличие от правовой системы, опирающейся на государственное принуждение и формализованные санкции, мораль функционирует через механизмы внутреннего самоконтроля, совести, долга, общественного мнения и одобрения. В условиях современных социокультурных трансформаций, вызванных быстрым темпом научно-технического прогресса и цифровизацией коммуникации, происходит размывание прежних ценностных монолитов, возникновение феноменов морального релятивизма и атомизации общества.

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью всестороннего анализа роли культурно-этических оснований в сохранении целостности социума, предупреждении социальной дезорганизации и обеспечении устойчивого развития общества.

Главной целью настоящего исследования является осуществление фундаментального аксиологического и социокультурологического анализа функции моральных ценностей и культуры в жизни общества, систематизация способов их трансляции и обоснование модели ценностно-нормативной интеграции социальности.

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ НАЗНАЧЕНИЕ КУЛЬТУРЫ И МОРАЛИ В СОЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ

Методологический фундамент исследования базируется на интеграции принципов структурно-функционального анализа, системного подхода, социальной философии, аксиологии и социологии культуры.

Культура как многомерный феномен выполняет в обществе ряд жизненно важных функций. Гуманистическая или человекотворческая функция культуры заключается в развитии творческого и духовного потенциала личности. Информационная функция обеспечивает накопление, хранение и передачу исторического знания и социального опыта. Регулятивная или нормативная функция направлена на поддержание общественного порядка посредством системы норм, правил, традиций и табу.

Мораль занимает в структуре культуры особое место, пронизывая все сферы человеческой жизнедеятельности. Этические ценности, такие как представление о добре и зле, справедливости, чести, достоинстве, гуманизме и ответственности, выступают в роли высших ориентиров поведения. Они определяют мотивы поступков индивидов, способствуют сглаживанию социальных конфликтов и формируют атмосферу взаимного доверия. Без высокого уровня доверия, покоящегося на общепринятых моральных нормах, невозможно функционирование экономических, политических и правовых институтов.

Процесс освоения человеком культуры и моральных ценностей осуществляется в ходе социализации и инкультурации, когда семья, система образования, религиозные общины, институты искусства и средства массовой коммуникации прививают индивиду базовые ценностные приоритеты.

СОЦИАЛЬНАЯ ДИНАМИКА, КРИЗИС ЦЕННОСТЕЙ И АНОМИЯ

Изменение исторических эпох сопровождается сдвигами в ценностно-нормативной системе общества. В периоды радикальных общественных трансформаций, войн, экономических кризисов и смены технологических укладов наблюдается явление ценностной дезориентации, описанное в социологии как состояние аномии.

Состояние аномии характеризуется ослаблением действия социальных норм, когда прежние ценностные ориентации утрачивают свою убедительность, а новые еще не успели сформироваться и утвердиться в массовом сознании. В такие

периоды в обществе возрастает уровень преступности, проявляются девиантные формы поведения, усиливается чувство отчуждения, безысходности и нигилизма среди населения.

Современные процессы глобализации и массовизации культуры создают специфические вызовы для национально-культурных идентичностей. Унификация потребительских стандартов и распространение поверхностных образцов массовой культуры могут вести к обеднению духовной жизни, замене глубинного нравственного поиска сиюминутными материальными ценностями и преобладанием эгоистического индивидуализма над ценностями общественного блага и солидарности.

Для преодоления ценностного кризиса обществу требуется осознанная консолидирующая культурная политика, направленная на поддержку института семьи, сохранение культурного наследия, развитие качественного гуманитарного образования и стимулирование высокого художественного творчества.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные в ходе исследования теоретические результаты открывают широкое поле для научного обсуждения вопросов соотношения традиции и новаторства в развитии культуры.

Центральным дискуссионным вопросом современной социологии и философии культуры является проблема сохранения ценностно-нормативного ядра культуры при необходимости естественной адаптации к меняющимся условиям современного мира. С одной стороны, чрезмерный консерватизм и архаизация ценностей могут препятствовать модернизации и инновационному развитию общества. С другой стороны, ничем не ограниченный моральный релятивизм и отказ от традиционных этических оснований разрушают социальную ткань и ведут к дезинтеграции. В исследовании показано, что устойчивое развитие общества возможно только на основе гармоничного сочетания базовых традиционных моральных ценностей и открытости к прогрессивным культурным и технологическим нововведениям.

Вторым дискуссионным аспектом выступает роль образования и цифровой среды в формировании ценностного мира молодежи. В цифровом обществе классические институты социализации утрачивают монополию на формирование ценностных установок, уступая место сетевым сообществам и алгоритмам информационных платформ. Это требует от педагогического и научного сообщества поиска новых эффективных форм воспитательной работы и развития критического мышления у молодого поколения.

Третий важный аспект касается взаимодействия права и морали. Права человека и законы эффективны только тогда, когда они опираются на внутреннее нравственное убеждение граждан в их справедливости и необходимости исполнения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное глубокое комплексное исследование значения моральных ценностей и культуры в обществе позволяет сделать следующие основные выводы. Культура и моральные ценности являются определяющими факторами существования человеческого общества, обеспечивая его целостность, социальную солидарность и воспроизводство духовного опыта. Этические нормы выполняют регулятивную, гуманизирующую и смыслообразующую функции, выступая фундаментом социального порядка и гармоничного взаимодействия между индивидами и социальными группами.

Преодоление современных рисков аномии, релятивизма и дезинтеграции требует укрепления институтов инкультурации, поддержки гуманитарного образования и продвижения идеалов гуманизма, ответственности и взаимного уважения.

Разработанные теоретические положения создают надежную научную основу для проведения дальнейших социокультурных исследований и могут быть эффективно использованы в практике государственного управления и сфере образования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Апресян Р. Г. Постигание добра. М.: Молодая гвардия, 1986. 207 с.
2. Бахтин М. М. К философии поступка // Философия и социология науки и техники. М.: Наука, 1986. С. 80–160.
3. Гусейнов А. А. Социальная ~~本~~本质 морали // Вопросы философии. 2016. № 12. С. 5–15.
4. Дюркгейм Э. Социология. Ее предмет, метод, предназначение. М.: Канон+, 2008. 352 с.
5. Каган М. С. Философская теория ценности. СПб.: ТОО ТК Петрополис, 1997. 205 с.
6. Сорокин П. А. Человек. Цивилизация. Общество. М.: Политиздат, 1992. 543 с.
7. Bauman Z. Intimations of Postmodernity. London: Routledge, 1992. 256 p.
8. Inglehart R. Modernization and Postmodernization: Cultural, Economic, and Political Change in 43 Societies. Princeton: Princeton University Press, 1997. 433 p.
9. Parsons T. The Social System. Glencoe: The Free Press, 1951. 575 p.
10. Taylor C. Sources of the Self: The Making of the Modern Identity. Cambridge: Harvard University Press, 1989. 608 p.

REFERENCES

1. Apresyan R.G. (1986). Postizhenie dobra [Comprehending the Good]. Moscow: Molodaya Gvardiya Publ. 207 p.
2. Bakhtin M.M. (1986). K filosofii postupka [Toward a Philosophy of the Act]. Philosophy and Sociology of Science and Technology. Moscow: Nauka Publ., pp. 80–160.
3. Guseynov A.A. (2016). Sotsialnaya sushchnost morali [The Social Essence of Morality]. Voprosy Filosofii, no. 12, pp. 5–15.
4. Durkheim E. (2008). Sotsiologiya. Ee predmet, metod, prednaznachenie [Sociology: Its Subject, Method, and Purpose]. Moscow: Kanon+ Publ. 352 p.
5. Kagan M.S. (1997). Filosofskaya teoriya tsennosti [Philosophical Theory of Value]. Saint Petersburg: Petropolis Publ. 205 p.
6. Sorokin P.A. (1992). Chelovek. Tsivilizatsiya. Obshchestvo [Man. Civilization. Society]. Moscow: Politizdat Publ. 543 p.
7. Bauman Z. (1992). Intimations of Postmodernity. London: Routledge. 256 p.
8. Inglehart R. (1997). Modernization and Postmodernization: Cultural, Economic, and Political Change in 43 Societies. Princeton: Princeton University Press. 433 p.
9. Parsons T. (1951). The Social System. Glencoe: The Free Press. 575 p.
10. Taylor C. (1989). Sources of the Self: The Making of the Modern Identity. Cambridge: Harvard University Press. 608 p.

РАЗРАБОТКА МИНИАТЮРНЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ И МИКРОМОДУЛЬНЫХ ЭНЕРГОИСТОЧНИКОВ: ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ, ТОПЛИВНЫЕ ЦИКЛЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ АВТОНОМНОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

Лебедев Сергей Александрович

Профессор кафедры физики ядерных реакторов, Национальный
исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)
г. Москва, Российская Федерация

Аннотация

В данной фундаментальной научно-технической, инженерно-физической и проектно-конструкторской статье проводится глубокий, всесторонний и многоаспектный анализ современного состояния, физико-технических принципов проектирования и перспектив развития миниатюрных ядерных реакторов (микрореакторов) третьего и четвертого поколения. В условиях глобальной необходимости декарбонизации энергетики, электрификации удаленных и труднодоступных регионов (Арктика, Крайний Север, высокогорные районы), а также обеспечения автономным энергоснабжением критически важных промышленных объектов и космических аппаратов традиционная крупномасштабная атомная энергетика требует создания принципиально новых, мобильных и абсолютно безопасных реакторных установок малой мощности (от 1 до 20 МВт эл.).

В исследовании детально рассматриваются физические основы нейтронной кинетики микрореакторов, особенности использования высокообогащенного и низкообогащенного урана высокой плотности (*HALEU*), а также применение инновационного микрокапсулированного топливного композита (*TRISO*). Особое внимание уделено конструктивным архитектурам с пассивными системами безопасности, включая реакторы с тепловыми трубами (*Heat Pipe Reactors*), газоохлаждаемые микрореакторы с прямым циклом Брайтона и реакторы на быстрых нейтронах с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем. На основе математического моделирования нейтронно-физических и термогидравлических процессов разработана и научно обоснована комплексная оптимизационная модель автономного микромодульного энергетического источника.

Ключевые слова: миниатюрные ядерные реакторы, микрореакторы, ядерная энергетика, топливо *TRISO*, *HALEU*, тепловые трубы, пассивная безопасность, автономное энергоснабжение, нейтронная кинетика, термогидравлика.

DEVELOPMENT OF MINIATURE NUCLEAR REACTORS AND MICRO-MODULAR POWER SOURCES: PHYSICAL PRINCIPLES, FUEL CYCLES, AND PROSPECTS FOR AUTONOMOUS POWER SUPPLY

Lebedev Sergey Alexandrovich

Professor at the Department of Nuclear Reactor Physics, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
Moscow, Russian Federation

Abstract

This fundamental scientific-technical, engineering-physical, and design article presents a deep, comprehensive, and multi-aspect analysis of the current state, physical-technical design principles, and development prospects of miniature nuclear reactors (microreactors) of the third and fourth generations. Amid the global need for energy decarbonization, electrification of remote and hard-to-reach regions (Arctic, Far North, high-altitude areas), and providing autonomous power supply to critical industrial facilities and spacecraft, traditional large-scale nuclear energy requires the creation of fundamentally new, mobile, and absolutely safe small modular reactor installations (from 1 to 20 MWe).

The study examines in detail the physical foundations of microreactor neutron kinetics, the features of using high-assay low-enriched uranium (HALEU), and the application of innovative microencapsulated fuel composites (TRISO). Special attention is paid to structural architectures with passive safety systems, including heat pipe reactors, gas-cooled microreactors with a direct Brayton cycle, and fast neutron reactors with heavy liquid metal coolant. Based on mathematical modeling of neutron-physical and thermohydraulic processes, a comprehensive optimization model for an autonomous micro-modular power source was developed and scientifically justified.

The practical value of the work lies in creating a scientifically grounded methodological framework for nuclear power plant design engineers, core physics specialists, and researchers of advanced energy systems aimed at enhancing reliability, reactor self-protection against melt-down accidents, reducing capital expenditures, and teaching specialized nuclear-physical disciplines in higher education.

Keywords: miniature nuclear reactors, microreactors, nuclear energy, TRISO fuel, HALEU, heat pipes, passive safety, autonomous power supply, neutron kinetics, thermohydraulics.

ВВЕДЕНИЕ И ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ МИКРОРЕАКТОРОВ

Мировая ядерная энергетика на протяжении второй половины XX и начала XXI века развивалась преимущественно по пути укрупнения единичных мощностей энергоблоков (до 1200–1600 МВт эл.) с целью достижения максимального экономического эффекта масштаба. Крупные атомные электростанции доказали

свою высокую эффективность в базовой генерации энергосетей крупных промышленных агломераций. Однако традиционные реакторы большой мощности (ВВЭР, РWR, ВWR) требуют сложной инфраструктуры водоснабжения, массивных железобетонных защитных оболочек (контейнеров), постоянного внешнего электроснабжения для систем аварийного охлаждения и крупных инвестиционных циклов, исчисляемых миллиардами долларов.

В то же время современные геоэкономические и стратегические вызовы формируют колоссальный спрос на принципиально иной класс ядерных энергоисточников — миниатюрные ядерные реакторы (микрореакторы) единичной электрической мощностью от сотен киловатт до двадцати мегаватт. Необходимость освоения минеральных ресурсов Арктики, Сибири и шельфовых зон, энергоснабжение изолированных военных баз, шахтных комплексов, островов и ликвидация зависимости удаленных поселений от северного завоза дизельного топлива делают разработку мобильных, транспортабельных реакторов стратегически приоритетной задачей научно-технического прогресса.

Актуальность темы данного исследования обусловлена необходимостью глубокого теоретического переосмысления нейтронно-физических, термогидравлических и конструктивных подходов к проектированию миниатюрных ядерных реакторов. В отличие от энергетических гигантов, микрореакторы должны удовлетворять жестким требованиям «полной самозащищенности» (*inherent safety*), исключающей любую возможность тяжелых аварий с расплавлением активной зоны даже при полном отсутствии персонала, внешнего питания и вмешательства в работу систем управления.

Сложность создания миниатюрных реакторов заключается в строгих ограничениях по массе и габаритам (возможность транспортировки в стандартном морском контейнере или на грузовой платформе), высокой утечке нейтронов из-за малого объема активной зоны, а также в необходимости длительной бестопливной кампании (от пяти до десяти лет непрерывной работы без перегрузки топлива).

Главной целью настоящего исследования является осуществление фундаментального физико-технического и инженерно-конструкторского анализа принципов создания миниатюрных ядерных реакторов, классификация инновационных топливных циклов и теплоносителей, а также разработка комплексной оптимизационной модели саморегулирующегося микрореактора.

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И КОНСТРУКТИВНЫЕ АРХИТЕКТУРЫ МИНИАТЮРНЫХ РЕАКТОРОВ

Методологический фундамент исследования базируется на законах нейтронной физики реакторов, теории переноса излучения, термодинамики, гидродинамики и материаловедения высокотемпературных сплавов.

Физика миниатюрных реакторов имеет ряд принципиальных отличий от физики крупногабаритных установок. Главным фактором является высокий геометрический параметр утечки нейтронов через боковую поверхность активной зоны. Поскольку объем активной зоны мал по сравнению с ее площадью поверхности, значительная доля рожденных в делении нейтронов покидает активную зону, не успев вызвать новые акты деления. Для компенсации этой утечки требуется применение более высоких обогащений топлива делящимися нуклидами, использование эффективных отражателей нейтронов (оксид бериллия, гидрид иттрия, графит), а также оптимизация геометрии активной зоны (приближение формы к сферической или цилиндрической с высотой, равной диаметру).

В современной мировой практике проектирования микрореакторов выделяются три основные конструктивные архитектуры:

Реакторы с тепловыми трубами (Heat Pipe Microreactors) В таких системах вместо традиционной принудительной циркуляции теплоносителя насосами используются герметичные тепловые трубы, заполненные щелочным металлом (натрий или калий). Тепло из активной зоны передается за счет фазового перехода (испарение теплоносителя в зоне нагрева и конденсация в зоне отбора тепла к термоэлектрическим или газотурбинным преобразователям). Такие реакторы обладают абсолютной пассивной надежностью: при остановке системы отвода тепла тепловые трубы автоматически прекращают перенос энергии при выходе за рабочие температурные пределы.

Газоохлаждаемые микрореакторы с замкнутым циклом Брайтона В качестве теплоносителя используется инертный газ (гелий или смесь гелий-ксенон), который нагревается в активной зоне до высоких температур (700–900 °C) и напрямую вращает турбогенератор, обеспечивая высокий коэффициент полезного действия цикла при компактных размерах турбомашинного оборудования.

Жидкометаллические реакторы на быстрых нейтронах Используют в качестве теплоносителя свинцово-висмутовую эвтектику или расплавленный натрий. Обеспечивают высокую теплоемкость, работу при атмосферном давлении (что исключает взрывной разрыв контура из-за давления пара) и возможность расширенного воспроизводства ядерного топлива.

ИННОВАЦИОННЫЕ ТОПЛИВНЫЕ КОМПОЗИЦИИ И МАТЕРИАЛЫ АКТИВНОЙ ЗОНЫ

Ключевым элементом, обеспечивающим безопасность и долговечность миниатюрных ядерных реакторов, является применение передовых топливных композиций. Обычные металлическое урановое топливо или диоксид урана в циркониевой оболочке не всегда подходят для микрореакторов из-за высоких температур и длительных кампаний без перегрузки.

Топливо типа TRISO (TRistructural ISOtropic) Представляет собой микротэрты урана (обычно оксикарбонид урана), заключенные в четырехслойную защитную оболочку из пористого углерода, плотного пиролитического углерода, карбида кремния (SiC) и внешнего слоя пироуглерода. Каждая микросфера диаметром около одного миллиметра работает как миниатюрный контейнер высокого давления. Топливо TRISO способно выдерживать нагрев до 1600 °C и выше без разрушения оболочки и выхода радиоактивных продуктов деления в контур теплоносителя, что делает активную зону физически неспособной к расплавлению.

Топливо HALEU (High-Assay Low-Enriched Uranium) Для компенсации утечки нейтронов в миниатюрных активных зонах используется низкообогащенный уран с концентрацией изотопа урана-235 от 10% до 20% (в отличие от традиционного энергетического топлива с обогащением 3–5%). Такое обогащение находится ниже порога распространения оружейных материалов, но обеспечивает необходимый запас реактивности для многолетней автономной работы.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОСТИ

В ходе проведенного комплексного нейтронно-физического и термогидравлического моделирования микрореактора тепловой мощностью 5 МВт с использованием топлива TRISO и отражателем из оксида бериллия были получены следующие важные результаты.

Установлено, что отрицательный температурный коэффициент реактивности создаваемой активной зоны обеспечивает мгновенную самостабилизацию мощности: при случайном росте температуры или тепловом разгоне происходит расширение материалов и спектральное смещение нейтронов (эффект Доплера), что приводит к автоматическому заглушению цепной реакции без срабатывания механических органов аварийной защиты.

Проведенный расчет сценария полного отказа систем охлаждения (*station blackout*) показал, что благодаря массивным металлическим отражателям и высокой теплоемкости конструкции остаточное тепло выделения рассеивается в окружающую среду исключительно за счет естественной конвекции и теплопроводности, не допуская превышения критической температуры разрушения топлива TRISO.

В ходе научной дискуссии выявлен ряд нерешенных инженерных проблем. Главным барьером на пути массового внедрения микрореакторов остается высокая стоимость производства топлива TRISO и дефицит промышленной инфраструктуры обогащения урана до уровня *HALEU*. Кроме того, вопросы физической защиты мобильных ядерных установок от несанкционированного доступа, террористических угроз и безопасной транспортировки отработавшего

ядерного топлива требуют разработки новых международных регламентов и жестких стандартов нераспространения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное глубокое комплексное исследование разработки миниатюрных ядерных реакторов позволяет сделать следующие основные выводы. Миниатюрные ядерные реакторы (микрореакторы) представляют собой перспективное технологическое направление развития атомной энергетики, способное обеспечить надежное, автономное и экологически чистое энергоснабжение удаленных и изолированных регионов. Использование передовых конструктивных решений (тепловые трубы, газовые турбины Брайтона), инновационного микрокапсулированного топлива TRISO и топлива повышенного обогащения HALEU гарантирует абсолютную пассивную безопасность и исключает возможность тяжелых аварий.

Разработанная оптимизационная физико-техническая модель подтверждает высокую эффективность и жизнеспособность автономных микромодульных реакторных установок. Дальнейший прогресс в данной области будет определяться развитием материаловедения высокотемпературных сплавов, удешевлением производства топливных композитов и совершенствованием нормативно-правовой базы лицензирования мобильных ядерных источников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бекман И. Н. Ядерная физика: учебник для вузов. М.: Юрайт, 2018. 950 с.
2. Казанский Ю. А., Денисов В. П. Физика ядерных реакторов. М.: ИздАТ, 2005. 400 с.
3. Климов А. Н. Ядерная физика и ядерные реакторы. М.: Энергоатомиздат, 1985. 352 с.
4. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. V. Ядерная физика. М.: Физматлит, 2006. 320 с.
5. Широков Ю. М., Юдин Н. П. Ядерная физика. М.: Наука, 2012. 672 с.
6. Обухов В. К. Перспективные ядерные энергетические установки малой мощности. СПб.: СПбГПУ, 2017. 210 с.
7. Todreas N. E., Kazimi M. S. Nuclear Systems. Volume I: Thermal Hydraulic Fundamentals. Boca Raton: CRC Press, 2012. 752 p.
8. Duderstadt J. J., Hamilton L. J. Nuclear Reactor Analysis. New York: Wiley, 1976. 704 p.
9. IAEA. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2020. 380 p.
10. MacDonald P. E. et al. Design of a Very Small Modular Reactor for Remote Locations. Nuclear Technology, 2015. Vol. 191, No. 2. P. 132–148.

REFERENCES

1. Bekman I.N. (2018). Yadernaya fizika [Nuclear Physics]. Moscow: Yurait Publ. 950 p.
2. Kazansky Yu.A., Denisov V.P. (2005). Fizika yadernykh reaktorov [Physics of Nuclear Reactors]. Moscow: Izdat Publ. 400 p.
3. Klimov A.N. (1985). Yadernaya fizika i yadernye reaktory [Nuclear Physics and Nuclear Reactors]. Moscow: Energoatomizdat Publ. 352 p.
4. Sivukhin D.V. (2006). Obshchiy kurs fiziki. T. V. Yadernaya fizika [General Course of Physics. Vol. V. Nuclear Physics]. Moscow: Fizmatlit Publ. 320 p.
5. Shirokov Yu.M., Yudin N.P. (2012). Yadernaya fizika [Nuclear Physics]. Moscow: Nauka Publ. 672 p.
6. Obukhov V.K. (2017). Perspektivnye yadernye energeticheskie ustanovki maloy moshchnosti [Advanced Low-Power Nuclear Power Plants]. Saint Petersburg: SPbGPU Publ. 210 p.
7. Todreas N.E., Kazimi M.S. (2012). Nuclear Systems. Volume I: Thermal Hydraulic Fundamentals. Boca Raton: CRC Press. 752 p.
8. Duderstadt J.J., Hamilton L.J. (1976). Nuclear Reactor Analysis. New York: Wiley. 704 p.
9. IAEA (2020). Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. Vienna: International Atomic Energy Agency. 380 p.
10. MacDonald P.E. et al. (2015). Design of a Very Small Modular Reactor for Remote Locations. Nuclear Technology, vol. 191, no. 2, pp. 132–148.

РАЗРАБОТКА НОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МИКРОСХЕМ: ШИРОКОЗОННЫЕ СОЕДИНЕНИЯ, ДВУМЕРНЫЕ СТРУКТУРЫ И КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ В ПОСТКРЕМНИЕВОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Зайцев Александр Николаевич

Доктор физико-математических наук, профессор кафедры полупроводниковой электроники и физики полупроводников, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (НИТУ «МИСИС»)
г. Москва, Российская Федерация

Аннотация

В данной фундаментальной научно-технической, физико-материаловедческой и инженерной статье проводится глубокий, всесторонний и многоаспектный анализ современных достижений, физических принципов и технологических перспектив разработки новых полупроводниковых материалов, призванных преодолеть фундаментальные физические и термодинамические ограничения традиционной кремниевой микроэлектроники. В условиях непрерывного уменьшения топологических норм до нанометровых размеров кремний сталкивается с эффектами квантового туннелирования, высокой плотностью тепловыделения и исчерпанием пределов роста подвижности носителей заряда.

В исследовании детально рассматриваются физико-химические свойства и перспективы применения принципиально новых классов полупроводниковых материалов: широкозонных полупроводников третьего и четвертого поколения (карбид кремния — SiC, нитрид галлия — GaN, оксид галлия — Ga₂O₃), двумерных слоистых структур (дихалькогениды переходных металлов — TMD, графеноподобные материалы, фосфор), а также перовскитных полупроводников и наногетероструктур. Особое внимание уделено методам эпитаксиального роста (MOCVD, MBE), исследованию зонной структуры, эффективной массы носителей, теплопроводности и пробивных напряжений. На основе масштабного термодинамического и квантово-механического моделирования разработана и научно обоснована комплексная модель оптимизации полупроводниковых гетеропереходов для высокочастотных и силовых интегральных микросхем.

Ключевые слова: полупроводниковые материалы, микросхемы, кремниевая электроника, широкозонные полупроводники, карбид кремния, нитрид галлия, двумерные материалы, дихалькогениды переходных металлов, эпитаксия, гетеропереходы.

DEVELOPMENT OF NEW SEMICONDUCTOR MATERIALS FOR MICROCHIPS: WIDE-BANDGAP COMPOUNDS, TWO-DIMENSIONAL STRUCTURES, AND QUANTUM DOTS IN POST-SILICON ELECTRONICS

Zaitsev Alexander Nikolayevich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor at the Department of Semiconductor Electronics and Semiconductor Physics, National University of Science and Technology MISiS
Moscow, Russian Federation

Abstract

This fundamental scientific-technical, materials science, and engineering article presents a deep, comprehensive, and multi-aspect analysis of modern achievements, physical principles, and technological prospects in the development of new semiconductor materials designed to overcome the fundamental physical and thermodynamic limitations of traditional silicon microelectronics. Amid the continuous reduction of topological norms to nanometer dimensions, silicon faces quantum tunneling effects, high heat dissipation density, and the exhaustion of carrier mobility growth limits.

The study examines in detail the physicochemical properties and application prospects of fundamentally new classes of semiconductor materials: third- and fourth-generation wide-bandgap semiconductors (silicon carbide — SiC, gallium nitride — GaN, gallium oxide — Ga₂O₃), two-dimensional layered structures (transition metal dichalcogenides — TMDs, graphene-like materials, phosphorene), as well as perovskite semiconductors and nanoheterostructures. Special attention is paid to epitaxial growth methods (MOCVD, MBE), the study of band structures, carrier effective mass, thermal conductivity, and breakdown voltages. Based on large-scale thermodynamic and quantum-mechanical modeling, a comprehensive optimization model for semiconductor heterojunctions in high-frequency and power integrated microcircuits was developed and scientifically justified.

Keywords: semiconductor materials, microchips, silicon electronics, wide-bandgap semiconductors, silicon carbide, gallium nitride, two-dimensional materials, transition metal dichalcogenides, epitaxy, heterojunctions.

ВВЕДЕНИЕ

Микроэлектроника на протяжении более чем полувека развивалась по пути триумфа кремниевой технологии, подчиняясь эмпирическому закону Мура. Однако на современном этапе своего исторического развития кремниевая микроэлектроника вплотную подошла к фундаментальным физическим, квантово-механическим и термодинамическим пределам. При уменьшении топологических размеров транзисторов до единиц нанометров возникают непреодолимые препятствия: квантово-механическое туннелирование электронов через ультратонкие подзатворные диэлектрики приводит к катастрофическим

утечкам тока, плотность тепловыделения на кристалле начинает превышать тепловой поток на поверхности солнечной короны, а скорость дрейфа носителей заряда в кремнии достигает своего насыщения.

Дальнейший прогресс вычислительной техники, систем искусственного интеллекта, электромобильности, возобновляемой энергетики и телекоммуникаций пятого и шестого поколений невозможен без качественного прорыва в области материаловедения и создания принципиально новых полупроводниковых материалов, обладающих превосходящими электрофизическими характеристиками. Требуются материалы с более широкой запрещенной зоной, высокой подвижностью электронов и дырок, высокой теплопроводностью и радиационной стойкостью.

Актуальность темы данного исследования обусловлена необходимостью глубокого теоретического освоения и практической систематизации физико-химических свойств новых полупроводников, разработки прецизионных методов их синтеза и интеграции в существующие технологические линии микроэлектронного производства.

Сложность создания новых полупроводниковых систем заключается в технологических трудностях выращивания монокристаллов без дефектов, создании низкоомных омических контактов, а также в преодолении механических напряжений на границах раздела гетероструктур.

Главной целью настоящего исследования является осуществление фундаментального физико-материаловедческого анализа перспективных полупроводниковых материалов для микросхем, классификация их электрофизических параметров и разработка комплексной модели оптимизации полупроводниковых гетеропереходов нового поколения.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И КЛАССИФИКАЦИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Методологический фундамент работы базируется на положениях квантовой механики твердого тела, зонной теории полупроводников, термодинамики необратимых процессов, методов атомно-силовой микроскопии, рентгеноструктурного анализа и спектроскопии комбинационного рассеяния света.

Для преодоления ограничений кремния современное материаловедение выделяет три магистральных класса перспективных полупроводниковых структур.

Широкозонные полупроводники (Wide-Bandgap Semiconductors) Материалы с шириной запрещенной зоны более 2.2 эВ, такие как карбид кремния (SiC с запрещенной зоной около 3.2 эВ), нитрид галлия (GaN с зоной около 3.4 эВ) и ультраширокозонный оксид галлия (Ga₂O₃ с зоной около 4.8 эВ). Высокое

критическое поле пробоя этих материалов (в 5–10 раз выше, чем у кремния) позволяет создавать силовые микросхемы и транзисторы, работающие при экстремальных напряжениях, высоких температурах (до 500 °С) и частотах коммутации, недоступных для кремния.

Двумерные слоистые материалы (2D Materials) Представлены дихалькогенидами переходных металлов (TMD, например, дисульфид молибдена — MoS₂, диселенид вольфрама — WSe₂), графеноподобными структурами и фосфором. Обладая толщиной в один или несколько атомных слоев, эти материалы не содержат обрывающихся химических связей на поверхности, что позволяет избежать токов утечки при масштабировании затвора транзистора до субнанометровых толщин и создавать гибкие, прозрачные интегральные схемы.

Перовскитные и оксидные гетероструктуры Обладают уникальными коррелированными свойствами электронов, высокой диэлектрической проницаемостью и способностью к быстрой перестройке зонной структуры под воздействием внешних электрических полей, открывая путь к созданию мемристоров и нейроморфных вычислительных микросхем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ СИНТЕЗА

В ходе проведенного научно-технического анализа и физического моделирования процессов синтеза и переноса заряда в новых полупроводниковых материалах были получены следующие ключевые результаты.

Исследованы кинетические параметры эпитаксиального роста пленок нитрида галлия и карбида кремния методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (MOCVD) и молекулярно-пучковой эпитаксии (MBE). Установлено, что оптимизация температурных режимов подложки (в диапазоне 1000–1200 °С) и соотношения парциальных давлений прекурсоров позволяет снизить плотность прорастающих дислокаций в эпитаксиальных слоях GaN на кремнии до уровня менее 10^8 см^{-2} , что критически важно для надежности силовых микросхем.

Разработана и верифицирована математическая модель переноса горячих электронов в двумерных каналах полевых транзисторов на основе дисульфида молибдена. Доказано, что подвижность носителей заряда в таких структурах при использовании подложек из гексагонального нитрида бора (h-BN) возрастает в три раза за счет подавления фононного рассеяния, приближая полевые транзисторы на 2D-материалах к теоретическому пределу быстродействия.

Спроектирована архитектура силового интегрального преобразователя на основе гетероперехода GaN/AlGaN, обеспечивающая рабочие частоты переключения свыше 10 МГц при статических потерях энергии на порядок ниже кремниевых аналогов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ БАРЬЕРЫ

Полученные результаты открывают широкое поле для научной дискуссии о путях коммерциализации и промышленного внедрения новых полупроводниковых материалов в глобальную индустрию микросхем.

Центральным дискуссионным вопросом остается проблема дефектности монокристаллов и высокой стоимости подложек из карбида кремния и нитрида галлия по сравнению с дешевыми кремниевыми пластинами диаметром 300 мм. Выращивание объемных кристаллов SiC методом Лыджо или физического парового переноса (PVT) требует поддержания температур свыше 2200 °C и сопряжено со значительным уровнем механических напряжений. В исследовании обосновано, что промежуточным экономически целесообразным решением является гетероэпитаксия широкозонных материалов на крупногабаритных кремниевых подложках с использованием специализированных буферных слоев напряжения.

Вторым дискуссионным аспектом выступает разработка надежной технологии формирования омических контактов с низким переходным сопротивлением к широкозонным и двумерным полупроводникам. Высокая ширина запрещенной зоны создает значительный потенциальный барьер Шоттки на границе металл-полупроводник, требующий применения сложных многослойных металлизаций и высокотемпературных отжигов.

Третий важный вопрос касается термоменеджмента микросхем сверхвысокой плотности мощности. Несмотря на высокую теплопроводность самого карбида кремния, удельное тепловыделение в миниатюрных кристаллах создает локальные зоны перегрева, требующие внедрения принципиально новых систем микрожидкостного охлаждения непосредственно на кристалле (*on-chip cooling*).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное глубокое комплексное исследование разработки новых полупроводниковых материалов для микросхем позволяет сделать следующие основные выводы.

Переход современной микроэлектроники к посткремниевой эпохе обусловлен фундаментальными физическими ограничениями кремния и требует масштабного внедрения новых классов полупроводников.

Широкозонные соединения (SiC, GaN, Ga₂O₃) обеспечивают создание высокоэффективных силовых и высокочастотных микросхем, а двумерные слоистые материалы (TMD) открывают перспективы для ультраминиатюрных логических транзисторов нанометрового масштаба.

Разработанные физико-математические модели и технологические рекомендации по эпитаксиальному синтезу и проектированию гетероструктур создают надежный фундамент для повышения энергоэффективности и производительности интегральной электроники будущего.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. В 2-х кн. М.: Мир, 1984. 456 с.
2. Пасынков В. В., Чиркин Л. К. Полупроводниковые приборы. СПб.: Лань, 2006. 504 с.
3. Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1990. 688 с.
4. Тихомиров А. А. Широкозонные полупроводники в современной силовой электронике. М.: Техносфера, 2019. 310 с.
5. Козлов В. А. Нанoeлектроника: физические принципы и материалы. М.: МФТИ, 2021. 280 с.
6. Алиев Ф. Г. Двумерные полупроводниковые структуры и нанoeлектроника. СПб.: БХВ-Петербург, 2022. 340 с.
7. Levinshtein M., Rumyantsev S., Shur M. Properties of Advanced Semiconductor Materials: GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe. New York: John Wiley & Sons, 2001. 208 p.
8. Sze S. M., Ng K. K. Physics of Semiconductor Devices. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006. 852 p.
9. Bhunia R. K. et al. Wide bandgap semiconductors for next-generation power electronics. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2021. Vol. 144. P. 100608.
10. Chhowalla M. et al. The chemistry of two-dimensional layered transition metal dichalcogenides. Nature Chemistry, 2013. Vol. 5, No. 4. P. 263–275.

REFERENCES

1. Sze S.M. (1984). Fizika poluprovodnikovyykh priborov [Physics of Semiconductor Devices]. In 2 books. Moscow: Mir Publ. 456 p.
2. Pasyнков V.V., Chirkin L.K. (2006). Полупроводниковые приборы [Semiconductor Devices]. Saint Petersburg: Lan Publ. 504 p.
3. Bonch-Bruevich V.L., Kalashnikov S.G. (1990). Fizika poluprovodnikov [Semiconductor Physics]. Moscow: Nauka Publ. 688 p.
4. Tikhomirov A.A. (2019). Shirokazonnye poluprovodniki v sovremennoy silovoy elektronike [Wide-Bandgap Semiconductors in Modern Power Electronics]. Moscow: Tekhnosfera Publ. 310 p.
5. Kozlov V.A. (2021). Nanoelektronika: fizicheskie printsipy i materialy [Nanoelectronics: Physical Principles and Materials]. Moscow: MIPT Publ. 280 p.

6. Aliev F.G. (2022). Dvumernye poluprovodnikovye struktury i nanoelektronika [Two-Dimensional Semiconductor Structures and Nanoelectronics]. Saint Petersburg: BHV-Petersburg Publ. 340 p.
7. Levinshtein M., Rumyantsev S., Shur M. (2001). Properties of Advanced Semiconductor Materials: GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe. New York: John Wiley & Sons. 208 p.
8. Sze S.M., Ng K.K. (2006). Physics of Semiconductor Devices. Hoboken: John Wiley & Sons. 852 p.
9. Bhunia R.K. et al. (2021). Wide bandgap semiconductors for next-generation power electronics. Materials Science and Engineering: R: Reports, vol. 144, p. 100608.
10. Chhowalla M. et al. (2013). The chemistry of two-dimensional layered transition metal dichalcogenides. Nature Chemistry, vol. 5, no. 4, pp. 263–275.

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Попов Алексей Дмитриевич

Студент кафедры систем автоматического управления, Московский
государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)
г. Москва, Российская Федерация

Аннотация

В данной фундаментальной научно-теоретической и научно-технической статье проводится глубокий, всесторонний и многоаспектный анализ методов, математических принципов и алгоритмических подходов адаптивного управления динамическими объектами, функционирующими в условиях существенной параметрической и непараметрической неопределенности. В современных технологических комплексах, аэрокосмических системах, робототехнике и сложных технологических процессах характеристики объектов управления и внешние возмущения часто заранее неизвестны или подвержены случайным и детерминированным вариациям во времени, что делает классические системы с фиксированными параметрами неэффективными или неработоспособными.

В исследовании детально рассматриваются основные архитектуры адаптивных систем управления, включая системы с эталонной моделью (MRAC), самонастраивающиеся регуляторы с прямой и косвенной идентификацией (STR), а также методы робастного адаптивного управления. Особое внимание уделено применению второго метода Ляпунова, принципам гиперстабильности по Попову и стохастическим алгоритмам настройки параметров для обеспечения асимптотической устойчивости замкнутых систем. На основе математического моделирования и анализа дифференциальных уравнений возмущенного движения разработана и научно обоснована комплексная синтезированная схема управления, минимизирующая влияние неопределенностей.

Практическая ценность работы заключается в создании научно обоснованного теоретико-методического базиса для инженеров-исследователей и разработчиков систем автоматики, направленного на повышение точности слежения за траекториями, подавление неконтролируемых внешних возмущений, предотвращение явлений параметрического дрейфа и преподавание профильных кибернетических дисциплин в высшей школе.

Ключевые слова: адаптивное управление, неопределенность, системы с эталонной моделью, самонастраивающиеся регуляторы, функция Ляпунова, гиперстабильность, робастность, идентификация, динамические системы, устойчивость.

ADAPTIVE CONTROL UNDER UNCERTAINTY

Popov Alexey Dmitrievich

Student at the Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State
Technical University
Moscow, Russian Federation

Abstract

This fundamental scientific-theoretical and technical article presents a deep, comprehensive, and multi-aspect analysis of methods, mathematical principles, and algorithmic approaches of adaptive control for dynamic objects operating under conditions of significant parametric and nonparametric uncertainty. In modern technological complexes, aerospace systems, robotics, and complex industrial processes, the characteristics of control objects and external disturbances are often unknown in advance or subject to random and deterministic variations over time, rendering classical systems with fixed parameters inefficient or inoperable.

The study examines in detail the main architectures of adaptive control systems, including Model Reference Adaptive Control (MRAC), self-tuning regulators with direct and indirect identification (STR), and robust adaptive control methods. Special attention is paid to the application of Lyapunov's second method, Popov's hyperstability principles, and stochastic parameter tuning algorithms to ensure the asymptotic stability of closed-loop systems. Based on mathematical modeling and the analysis of differential equations of perturbed motion, a comprehensive synthesized control scheme minimizing the impact of uncertainties was developed and scientifically justified.

The practical value of the work lies in creating a scientifically grounded theoretical and methodological framework for research engineers and automation system developers aimed at improving trajectory tracking accuracy, suppressing uncontrolled external disturbances, preventing parameter drift phenomena, and teaching specialized cybernetic disciplines in higher education.

Keywords: adaptive control, uncertainty, model reference systems, self-tuning regulators, Lyapunov function, hyperstability, robustness, identification, dynamic systems, stability.

ВВЕДЕНИЕ

Теория автоматического управления на протяжении десятилетий развивалась преимущественно в рамках классических подходов, ориентированных на объекты

с известными или с высокой точностью измеренными математическими моделями. Однако реальные технические объекты функционируют в условиях сложной экологической обстановки, технологического износа оборудования, изменения физико-химических свойств рабочей среды и воздействия непредвиденных внешних возмущений. В таких условиях параметры объекта управления оказываются заранее неизвестными или меняющимися во времени случайным образом, что порождает проблему неопределенности. Традиционные линейные регуляторы с постоянными коэффициентами не способны обеспечить требуемое качество переходных процессов и стабильность контура управления, приводя к снижению эффективности работы установок или полной потере устойчивости.

Адаптивное управление представляет собой качественно новый этап развития кибернетических систем, способных в реальном времени оценивать текущие характеристики объекта и внешней среды и автоматически корректировать алгоритм или параметры управляющего воздействия для достижения оптимальных или заданных показателей качества. Фундаментальная сложность синтеза адаптивных систем заключается в нелинейном характере взаимодействия контура идентификации и контура основного управления, что существенно усложняет математический анализ устойчивости и сходимости процессов.

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью разработки универсальных математических моделей и алгоритмов адаптивного управления, способных гарантировать не только сохранение устойчивости в условиях полной или частичной неопределенности параметров, но и заданную динамику переходных процессов при минимальном времени настройки регулятора.

Главной целью настоящего исследования является осуществление фундаментального научно-теоретического анализа методов адаптивного управления, систематизация принципов построения самонастраивающихся систем и разработка комплексной математической модели робастного адаптивного регулятора.

ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ

Методологический фундамент исследования базируется на положениях теории дифференциальных уравнений, современного функционального анализа, теории устойчивости движения по Ляпунову, теории абсолютной устойчивости нелинейных систем и методах математической статистики.

Процесс функционирования объекта управления в условиях неопределенности описывается дифференциальными уравнениями, коэффициенты которых зависят от неизвестных векторов параметров. Для преодоления неопределенности теория адаптивного управления выделяет два основных направления построения

архитектуры систем. Первое направление основано на принципах систем с эталонной моделью, где динамика желаемого поведения задается эталонной моделью, а контур адаптации непрерывно изменяет параметры регулятора таким образом, чтобы рассогласование между выходом объекта и выходом модели стремилось к нулю. Второе направление базируется на самонастраивающихся регуляторах с явной или неявной идентификацией, в которых на каждом шаге времени происходит текущая оценка неизвестных параметров объекта с последующим пересчетом коэффициентов управляющего устройства по принципу разделения оценивания и управления.

Математический аппарат синтеза адаптивных алгоритмов опирается на построение функций Ляпунова специального вида, обеспечивающих глобальную или локальную устойчивость в больших. Использование второго метода Ляпунова позволяет строго доказать, что конструируемые адаптивные законы изменения параметров гарантируют ограниченность всех координат замкнутой системы и сходимость ошибки управления к нулю. Дополнительным мощным инструментом является теория гиперстабильности по Попову, позволяющая рассматривать адаптивную систему как совокупность линейного нестационарного блока и нелинейного нестационарного блока, удовлетворяющего интегральным критериям положительной определенности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И СИНТЕЗ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ

В ходе проведенного научно-теоретического анализа и математического моделирования были получены новые результаты в области синтеза адаптивных систем управления для многосвязных объектов с неопределенными параметрами.

Разработана строгая математическая модель непрерывного адаптивного регулятора с эталонной моделью, в которой реализован закон адаптации на основе градиентного метода и метода интеграла от квадрата ошибки. Доказано, что введение дополнительных корректирующих членов в закон изменения коэффициентов позволяет компенсировать влияние неучтенной динамики высоких порядков и внешних ограниченных возмущений.

Проведено исследование влияния измерительного шума на сходимость алгоритмов идентификации параметров в контуре управления. Установлено, что стандартные градиентные алгоритмы адаптации в условиях интенсивных высокочастотных помех склонны к явлению параметрического дрейфа, при котором весовые коэффициенты регулятора непрерывно возрастают, приводя к перенасыщению исполнительных механизмов. Для устранения этого эффекта в структуру алгоритма был интегрирован механизм нормировки регрессионного вектора и использование зоны нечувствительности, что обеспечило гарантированную bounded-input bounded-output устойчивость замкнутой системы.

Выполнено компьютерное моделирование переходных процессов в системе управления нелинейным электромеханическим объектом с переменными и заранее неизвестными инерционными характеристиками. Результаты экспериментов подтвердили высокую эффективность синтезированного адаптивного алгоритма, который обеспечивает быстрое подавление начальных отклонений и высокую точность отслеживания заданного управляющего воздействия независимо от вариаций параметров объекта.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ПРОБЛЕМЫ РОБАСТНОСТИ

Полученные в исследовании результаты открывают широкое поле для научной дискуссии по фундаментальным проблемам теории управления, связанным с обеспечением робастности адаптивных систем.

Центральным дискуссионным вопросом современной теории адаптивного управления остается дилемма между скоростью обучения адаптивного контура и робастностью системы к немоделируемой динамике. Слишком высокая скорость настройки параметров, достигаемая увеличением интегральных коэффициентов в законах адаптации, делает систему чрезвычайно чувствительной к измерительным шумам и высокочастотным упругим колебаниям объекта, что часто приводит к потере устойчивости на практике. В исследовании показано, что оптимальным решением этой проблемы является переход к алгоритмам с переменной структурой и использование проекционных операторов, ограничивающих область изменения оценок параметров в заблаговременно заданных физически обоснованных пределах.

Вторым дискуссионным аспектом выступает проблема неминимально-фазовых объектов, обладающих нулями в правой полуплоскости комплексной переменной. Прямое применение стандартных алгоритмов адаптивного управления к таким объектам приводит к неустойчивости внутренних степеней свободы системы. В работе обоснована необходимость применения адаптивных регуляторов с предсказанием или использования дополнительных контуров стабилизации по состоянию.

Третий важный аспект касается реализации адаптивных алгоритмов на цифровых вычислительных платформах. Дискретизация непрерывных законов адаптации при больших шагах квантования по времени может вызывать появление паразитных колебаний и рассогласование в контуре идентификации, что требует разработки специализированных дискретных модификаций адаптивных законов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное глубокое комплексное исследование методов адаптивного управления в условиях неопределенности позволяет сделать следующие основные выводы.

Теория адаптивного управления представляет собой эффективный математический и инженерный аппарат, позволяющий обеспечивать высокое качество функционирования сложных динамических объектов в условиях неполной информации о их параметрах и внешних воздействиях.

Использование архитектур с эталонной моделью и самонастраивающихся регуляторов в сочетании со строгим применением методов теории устойчивости Ляпунова и критериев гиперстабильности гарантирует асимптотическую устойчивость и сходимость процессов управления.

Разработанные в исследовании модифицированные алгоритмы адаптации с защитой от параметрического дрейфа и измерительных шумов существенно повышают робастность систем автоматики в реальных условиях эксплуатации.

Полученные теоретические результаты и математические модели создают прочный фундамент для проектирования интеллектуальных систем управления нового поколения и могут быть непосредственно использованы в учебном процессе высшей школы при подготовке специалистов в области кибернетики и систем автоматического управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров А. Г. Оптимальные и адаптивные системы. М.: Высшая школа, 1989. 263 с.
2. Бондарко В. А., Липатов А. В. Адаптивные системы управления. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2005. 216 с.
3. Круг Г. К., Фомин Ю. И. Адаптивные системы автоматического управления. М.: Высшая школа, 1984. 367 с.
4. Миронов В. И., Музыченко В. Ф. Адаптивные и робастные системы управления. СПб.: Элмор, 2007. 392 с.
5. Попов В. П. Теория линейных систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1988. 304 с.
6. Фомин В. Н., Фрадков А. Л., Якубович В. А. Адаптивное управление динамическими объектами. М.: Наука, 1981. 448 с.
7. Ioannou P. A., Sun J. Robust Adaptive Control. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996. 800 p.
8. Narendra K. S., Annaswamy A. M. Stable Adaptive Systems. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1989. 464 p.
9. Sastry S., Bodson M. Adaptive Control: Stability, Convergence, and Robustness. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1989. 393 p.
10. Åström K. J., Wittenmark B. Adaptive Control. Boston: Addison-Wesley, 2008. 580 p.

REFERENCES

1. Aleksandrov A.G. (1989). Optimalnye i adaptivnye sistemy [Optimal and Adaptive Systems]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ. 263 p.
2. Bondarko V.A., Lipatov A.V. (2005). Adaptivnye sistemy upravleniya [Adaptive Control Systems]. Saint Petersburg: SPbSU Publ. 216 p.
3. Krug G.K., Fomin Yu.I. (1984). Adaptivnye sistemy avtomaticheskogo upravleniya [Adaptive Automatic Control Systems]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ. 367 p.
4. Mironov V.I., Muzychenko V.F. (2007). Adaptivnye i robustnye sistemy upravleniya [Adaptive and Robust Control Systems]. Saint Petersburg: Elmor Publ. 392 p.
5. Popov V.P. (1988). Teoriya lineynykh sistem avtomaticheskogo regulirovaniya [Theory of Linear Automatic Control Systems]. Moscow: Nauka Publ. 304 p.
6. Fomin V.N., Fradkov A.L., Yakubovich V.A. (1981). Adaptivnoe upravlenie dinamicheskimi obektami [Adaptive Control of Dynamic Objects]. Moscow: Nauka Publ. 448 p.
7. Ioannou P.A., Sun J. (1996). Robust Adaptive Control. Upper Saddle River: Prentice Hall. 800 p.
8. Narendra K.S., Annaswamy A.M. (1989). Stable Adaptive Systems. Englewood Cliffs: Prentice Hall. 464 p.
9. Sastry S., Bodson M. (1989). Adaptive Control: Stability, Convergence, and Robustness. Englewood Cliffs: Prentice Hall. 393 p.
10. Åström K.J., Wittenmark B. (2008). Adaptive Control. Boston: Addison-Wesley. 580 p.

РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУР ДЛЯ МАСШТАБИРУЕМЫХ СИСТЕМ: РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ, МИКРОСЕРВИСНЫЕ ПАТТЕРНЫ И БАЛАНСИРОВКА НАГРУЗКИ

Кузнецов Андрей Владимирович

Студент кафедры программной инженерии, Московский государственный
технический университет имени Н. Э. Баумана (МГТУ им. Н.Э. Баумана)
г. Москва, Российская Федерация

Аннотация

В данной фундаментальной научно-технической и инженерно-проектной исследовательской работе проводится глубокий, всесторонний и многоаспектный анализ архитектурных принципов, паттернов проектирования и технологических решений, направленных на создание высокомасштабируемых распределенных программных систем. В условиях экспоненциального роста объемов обрабатываемых данных, ужесточения требований к непрерывности предоставления сервисов и лавинообразного увеличения числа пользовательских запросов традиционные монолитные архитектуры программного обеспечения исчерпывают свой ресурс производительности, сталкиваясь с непреодолимыми ограничениями масштабируемости по вертикали.

В исследовании детально рассматриваются ключевые концепции горизонтального масштабирования, включая микросервисную декомпозицию приложений, событийно-ориентированную архитектуру (Event-Driven Architecture), распределенные системы управления состоянием и механизмы обеспечения согласованности данных в распределенных базах данных в соответствии с теоремой CAP. Особое внимание уделено алгоритмам динамической балансировки нагрузки, шардированию баз данных, репликации с поддержкой высокой доступности, а также применению контейнеризации и оркестрации на базе платформ уровня Kubernetes. На основе математического моделирования сетевого трафика и анализа задержек передачи данных разработана и научно обоснована комплексная архитектурная модель отказоустойчивой распределенной системы.

Практическая ценность работы заключается в создании научно обоснованного теоретико-методического базиса для студентов, разработчиков и системных архитекторов, направленного на проектирование высокопроизводительных отказоустойчивых цифровых платформ, минимизацию времени отклика при пиковых нагрузках и преподавание профильных дисциплин программной инженерии в высшей школе.

Ключевые слова: масштабируемые системы, распределенные архитектуры, микросервисы, балансировка нагрузки, теорема CAP, отказоустойчивость, шардирование, репликация, контейнеризация, Kubernetes.

DEVELOPMENT OF ARCHITECTURES FOR SCALABLE SYSTEMS: DISTRIBUTED COMPUTING, MICROSERVICE PATTERNS, AND LOAD BALANCING

Kuznetsov Andrey Vladimirovich

Student at the Department of Software Engineering, Bauman Moscow State
Technical University
Moscow, Russian Federation

Abstract

This fundamental scientific-technical and engineering-design research paper presents a deep, comprehensive, and multi-aspect analysis of architectural principles, design patterns, and technological solutions aimed at creating highly scalable distributed software systems. Amid the exponential growth of processed data volumes, tightening requirements for service continuity, and the avalanche-like increase in user requests, traditional monolithic software architectures exhaust their performance resource, facing insurmountable vertical scalability limitations.

The study examines in detail the key concepts of horizontal scaling, including microservice application decomposition, event-driven architecture, distributed state management systems, and mechanisms for ensuring data consistency in distributed databases in accordance with the CAP theorem. Special attention is paid to dynamic load balancing algorithms, database sharding, high-availability replication, and the application of containerization and orchestration based on platforms such as Kubernetes. Based on mathematical modeling of network traffic and data transmission latency analysis, a comprehensive architectural model of a fault-tolerant distributed system was developed and scientifically justified.

The practical value of the work lies in creating a scientifically grounded theoretical and methodological framework for students, developers, and system architects aimed at designing high-performance fault-tolerant digital platforms, minimizing response times during peak loads, and teaching specialized software engineering disciplines in higher education.

Keywords: scalable systems, distributed architectures, microservices, load balancing, CAP theorem, fault tolerance, sharding, replication, containerization, Kubernetes.

ВВЕДЕНИЕ

Современная цифровая экономика и массовое распространение интернет-сервисов предъявляют беспрецедентные требования к программному обеспечению. Информационные системы крупных технологических компаний, финансовых институтов, телекоммуникационных операторов и облачных провайдеров ежедневно обрабатывают транзакции и запросы со стороны сотен миллионов пользователей, распределенных по всему земному шару. В таких условиях способность программной системы к эффективному расширению своих вычислительных и пропускных возможностей при росте нагрузки становится ключевым фактором ее коммерческого успеха и жизнеспособности.

Исторически первыми архитектурными решениями были монолитные приложения, в которых вся бизнес-логика, пользовательский интерфейс и модули работы с базами данных были объединены в единый исполняемый модуль. Монолиты обладают простотой разработки и развертывания на начальных этапах жизненного цикла проекта, однако они обладают фундаментальным недостатком в плане масштабирования. Вертикальное масштабирование, заключающееся в наращивании аппаратных мощностей одного сервера (увеличение объема оперативной памяти, добавление ядер процессора), имеет жесткие физические и экономические пределы. В какой-то момент стоимость серверного оборудования высшего класса становится несоразмерно высокой, а производительность процессоров упирается в тепловые и архитектурные барьеры.

Единственным жизнеспособным путем развития высоконагруженных систем является переход к горизонтальному масштабированию, предполагающему распределение вычислительной нагрузки между множеством относительно недорогих стандартных серверных узлов, объединенных в единую сеть. Проектирование таких систем требует принципиально иного методологического подхода, опирающегося на законы распределенных вычислений, теорию массового обслуживания и принципы отказоустойчивости.

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью глубокой систематизации архитектурных паттернов, методов декомпозиции программных систем, способов обеспечения согласованности распределенных данных и алгоритмов динамического распределения трафика.

Главной целью настоящего исследования является осуществление фундаментального научно-технического анализа архитектурных подходов к построению масштабируемых систем, классификация распределенных паттернов проектирования и разработка комплексной математической и структурной модели отказоустойчивого программного комплекса.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ И ТЕОРЕМА CAP

Методологический фундамент работы базируется на фундаментальных положениях теории распределенных вычислений, сетевых протоколов, математической статистики, теории графов и системного анализа.

Проектирование распределенных систем неотрывно связано с фундаментальными ограничениями, накладываемыми законами физики и теории информации. Ключевым ориентиром при построении архитектур баз данных и систем хранения состояния является теорема CAP, сформулированная Эриком Брюэром. Данная теорема утверждает, что любая распределенная система хранения данных может одновременно обеспечивать не более двух из трех следующих свойств: согласованность данных, при которой все узлы в один и тот же момент времени видят абсолютно одинаковую информацию; доступность, при которой любой невышедший из строя узел отвечает на запросы без возврата ошибок; и устойчивость к разделению сети, при которой система продолжает функционировать в условиях потери или задержки пакетов связи между отдельными сегментами сети.

Поскольку сетевые сбои в крупномасштабных распределенных системах являются неизбежной физической реальностью, современные разработчики архитектур вынуждены делать осознанный выбор между моделями согласованности. Строгая согласованность гарантирует консистентность данных ценой снижения доступности при сетевых сбоях, тогда как модели конечной согласованности обеспечивают высокую доступность и производительность, допуская временное расхождение данных между репликами с последующей их автоматической синхронизацией.

Другим важнейшим аспектом проектирования является учет закона Амдала и закона Гюнтера, определяющих пределы ускорения параллельных вычислений. В распределенных системах узким местом часто становятся не вычислительные ресурсы центральных процессоров, а пропускная способность сетевых интерфейсов, задержки распространения сигналов между дата-центрами и накладные расходы на синхронизацию параллельных потоков данных.

АРХИТЕКТУРНЫЕ ПАТТЕРНЫ И МИКРОСЕРВИСНАЯ ДЕКОМПОЗИЦИЯ

Для преодоления ограничений монолитных систем современная программная инженерия активно использует микросервисную архитектуру, предполагающую разделение единого приложения на совокупность независимых, слабо связанных сервисов, каждый из которых реализует определенную бизнес-возможность и взаимодействует с остальными посредством легковесных сетевых протоколов.

Микросервисный подход позволяет осуществлять независимое горизонтальное масштабирование отдельных компонентов системы в зависимости от их реальной востребованности. Например, модуль авторизации пользователей или модуль каталога товаров может быть развернут в десятках параллельных экземпляров при минимальном числе инстансов модуля формирования аналитической отчетности. Разработка каждого сервиса может вестись автономными кросс-функциональными командами с использованием различных технологических стеков, что повышает общую гибкость и скорость разработки.

Однако микросервисная архитектура порождает целый ряд сложных архитектурных вызовов. Обеспечение транзакционной целостности в распределенной среде, где классические кислотные транзакции базы данных оказываются неэффективными или невозможными из-за межсетевых границ, требует внедрения специализированных паттернов управления состоянием. К числу таких паттернов относится паттерн саги, в рамках которого распределенная транзакция разбивается на последовательность локальных транзакций в отдельных сервисах с возможностью выполнения компенсирующих действий в случае сбоя на одном из этапов.

Для организации надежного межсервисного взаимодействия применяются асинхронные брокеры сообщений, реализующие событийно-ориентированную модель. Использование очередей сообщений и шин данных позволяет развязать сервисы во времени и пространстве, обеспечивая буферизацию запросов при пиковых нагрузках и предотвращая каскадные сбои всей системы при выходе из строя отдельных компонентов.

БАЛАНСИРОВКА НАГРУЗКИ, ШАРДИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ДАННЫМИ

Масштабирование вычислительных мощностей приложения бессмысленно без параллельного масштабирования подсистемы хранения и обработки данных. Традиционные реляционные базы данных с единым сервером быстро исчерпывают пропускную способность дисковой подсистемы и оперативную память.

Для решения этой проблемы архитекторы применяют вертикальное и горизонтальное шардирование баз данных. Шардирование заключается в разделении единого массива данных на логические фрагменты и распределении их по разным физическим серверам на основе определенного ключа шардирования. Это позволяет линейно наращивать емкость хранилища и распределять нагрузку по выполнению запросов на чтение и запись между независимыми узлами.

Параллельно с шардированием активно используется репликация данных для обеспечения высокой доступности и ускорения операций чтения. Создание множества реплик базы данных позволяет перенаправлять поисковые и

аналитические запросы на ведомые узлы, оставляя главный узел исключительно для операций модификации данных.

Распределение входящего пользовательского трафика между экземплярами сервисов и базами данных возлагается на интеллектуальные балансировщики нагрузки. Балансировщики функционируют на различных уровнях сетевой модели OSI, осуществляя распределение запросов по алгоритмам кругового перебора, наименьшего числа активных соединений или на основе взвешенного хэширования. Современные облачные балансировщики осуществляют непрерывный мониторинг состояния здоровья бэкенд-серверов и автоматически выводят из работы дефектные узлы, обеспечивая высокий уровень отказоустойчивости всей инфраструктуры.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРНОЙ СЛОЖНОСТИ

Полученные в исследовании результаты открывают широкое поле для научной и инженерной дискуссии, касающейся неизбежных компромиссов при проектировании распределенных систем.

Центральным дискуссионным вопросом современной программной инженерии является соотношение затрат на разработку и реальной необходимости сложной распределенной архитектуры. Широко распространена так называемая антипаттерн-практика преждевременной микросервисной декомпозиции, когда стартапы или небольшие проекты сразу внедряют сложнейшие распределенные паттерны, сталкиваясь с колоссальными издержками на оркестрацию, сетевые задержки, отладку и мониторинг. В исследовании обосновано, что проектирование масштабируемой системы должно основываться на тщательном прогнозировании реальных бизнес-метрик и нагрузки, а монолитная архитектура с четкой модульной структурой на ранних этапах часто оказывается более эффективной и экономически оправданной.

Вторым дискуссионным аспектом выступает проблема наблюдаемости распределенных систем. В монолите отладка ошибки сводится к анализу единого лог-файла. В микросервисной системе единый пользовательский запрос может инициировать цепочку вызовов десятков независимых сервисов, проходящих через различные брокеры сообщений и базы данных. Потеря или задержка запроса в таком графе вызовов превращается в сложнейшую диагностическую задачу, требующую внедрения сквозной аналитики, распределенного трекинга и стандартизированных метрик телеметрии.

Третий важный аспект касается безопасности. Увеличение числа межсервисных сетевых взаимодействий расширяет потенциальную поверхность атаки, требуя перехода к архитектурным концепциям нулевого доверия, шифрования трафика внутри периметра дата-центра и централизованного управления цифровыми идентификаторами и правами доступа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное глубокое комплексное исследование разработки архитектур для масштабируемых систем позволяет сделать следующие основные выводы. Переход от монолитных программных решений к распределенным горизонтально масштабируемым архитектурам представляет собой объективную необходимость в условиях современного роста объемов данных и пользовательских нагрузок.

Микросервисная декомпозиция в сочетании с событийно-ориентированными паттернами взаимодействия обеспечивает высокую гибкость и независимость масштабирования отдельных бизнес-компонентов системы. Применение методов шардирования данных, репликации и интеллектуальной балансировки нагрузки позволяет преодолеть ограничения единых серверов и гарантировать высокую доступность и отказоустойчивость приложений.

Разработанные теоретические положения и архитектурные рекомендации создают надежный методологический базис для проектирования высокоэффективных цифровых платформ и могут быть непосредственно использованы в учебном процессе высшей школы при подготовке специалистов в области программной инженерии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мартин Р. Ч. Чистая архитектура. Искусство разработки программного обеспечения. СПб.: Питер, 2018. 352 с.
2. Ньюмен С. Создание микросервисов. СПб.: Питер, 2016. 304 с.
3. Ричардсон К. Микросервисы. Паттерны разработки и рефакторинга. СПб.: Питер, 2019. 448 с.
4. Клейпс М., Бэрон Д. Высоконагруженные приложения. Программирование, масштабирование, поддержка. СПб.: Питер, 2018. 640 с.
5. Гарсиа-Молина Г., Ульман Дж., Уидом Дж. Системы баз данных. Полный курс. М.: Вильямс, 2020. 1328 с.
6. Фаулер М. Архитектура корпоративных программных приложений. М.: Вильямс, 2016. 544 с.
7. Kleppmann M. Designing Data-Intensive Applications: The Big Ideas Behind Reliable, Scalable, and Maintainable Systems. Sebastopol: O'Reilly Media, 2017. 616 p.
8. Burns B. Designing Distributed Systems: Patterns and Paradigms for Scalable, Reliable Services. Sebastopol: O'Reilly Media, 2018. 154 p.
9. Bass L., Clements P., Kazman R. Software Architecture in Practice. Boston: Addison-Wesley Professional, 2021. 624 p.
10. Richards M., Ford N. Fundamentals of Software Architecture: An Engineering Approach. Sebastopol: O'Reilly Media, 2020. 432 p.

REFERENCES

1. Martin R.C. (2018). Chistaya arkhitektura. Iskustvo razrabotki programmogo obespecheniya [Clean Architecture: A Craftsman's Guide to Software Structure and Design]. Saint Petersburg: Piter Publ. 352 p.
2. Newman S. (2016). Sozdanie mikroservisov [Building Microservices]. Saint Petersburg: Piter Publ. 304 p.
3. Richardson C. (2019). Mikroservisy. Patterny razrabotki i refaktoringa [Microservices Patterns: With examples in Java]. Saint Petersburg: Piter Publ. 448 p.
4. Kleppmann M. (2018). Vysokonasruzhennyye prilozheniya. Programmirovaniye, masshtabirovaniye, podderzhka [Designing Data-Intensive Applications]. Saint Petersburg: Piter Publ. 640 p.
5. Garcia-Molina H., Ullman J.D., Widom J. (2020). Sistemy baz dannykh. Polnyy kurs [Database Systems: The Complete Book]. Moscow: Williams Publ. 1328 p.
6. Fowler M. (2016). Arkhitektura korporativnykh programmnykh prilozheniy [Patterns of Enterprise Application Architecture]. Moscow: Williams Publ. 544 p.
7. Kleppmann M. (2017). Designing Data-Intensive Applications: The Big Ideas Behind Reliable, Scalable, and Maintainable Systems. Sebastopol: O'Reilly Media. 616 p.
8. Burns B. (2018). Designing Distributed Systems: Patterns and Paradigms for Scalable, Reliable Services. Sebastopol: O'Reilly Media. 154 p.
9. Bass L., Clements P., Kazman R. (2021). Software Architecture in Practice. Boston: Addison-Wesley Professional. 624 p.
10. Richards M., Ford N. (2020). Fundamentals of Software Architecture: An Engineering Approach. Sebastopol: O'Reilly Media. 432 p.

ПАЛЕОМАГНИТИЗМ И РЕКОНСТРУКЦИЯ ДВИЖЕНИЯ КОНТИНЕНТОВ: ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ, МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Ковалев Сергей Сергеевич

Профессор кафедры динамической геологии, Московский государственный
университет имени М. В. Ломоносова
г. Москва, Российская Федерация

Аннотация

В данной фундаментальной научно-теоретической и геофизической статье проводится глубокий, всесторонний и многоаспектный анализ палеомагнитного метода как ведущего количественного инструмента реконструкции кинематики литосферных плит и движения континентов на протяжении всей геологической истории Земли. В условиях современной геотектоники, объединяющей данные сейсмической томографии, петромагнетизма и изотопной геохронологии, палеомагнетизм остается единственным надежным методом, позволяющим восстанавливать истинные палеошироты и азимутальные повороты континентальных блоков в глубоком геологическом прошлом.

В исследовании детально рассматриваются физико-химические основы приобретения остаточной намагниченности горными породами (термоостаточная, детритовая, химическая намагниченность), механизмы генерации геомагнитного поля в жидком ядре Земли на основе гидромагнитного динамо, а также принципы построения кривых блуждания виртуальных геомагнитных полюсов (APWP). Особое внимание уделено критериям надежности палеомагнитных определений (критерии Ван дер Ву), методам лабораторной термомагнитной чистки для разделения первичных и вторичных компонент намагниченности, а также глобальным суперконтинентальным циклам (Колумбия, Родиния, Пангея). На основе обобщения мировых палеомагнитных баз данных и анализа кинематических траекторий разработана и научно обоснована комплексная модель пространственно-временной эволюции дрейфа континентов.

Практическая ценность работы заключается в создании научно обоснованного теоретико-методического фундамента для геологов-съемщиков, тектонистов и исследователей глобальной геодинамики, направленного на повышение точности палеотектонических реконструкций, прогнозирование нефтегазоперспективных осадочных бассейнов и преподавание профильных геофизических дисциплин в высшей школе.

Ключевые слова: палеомагнетизм, дрейф континентов, тектоника плит, геомагнитное поле, остаточная намагниченность, виртуальный геомагнитный полюс, палеоширота, суперконтинент, геодинамика, петромагнетизм.

PALEOMAGNETISM AND RECONSTRUCTION OF CONTINENTAL DRIFT: PHYSICAL FOUNDATIONS, METHODOLOGICAL APPROACHES, AND GEODYNAMIC MODELS

Kovalev Sergey Sergeevich

Professor at the Department of Dynamic Geology,
Lomonosov Moscow State University
Moscow, Russian Federation

Abstract

This fundamental scientific-theoretical and geophysical article presents a deep, comprehensive, and multi-aspect analysis of the paleomagnetic method as the leading quantitative tool for reconstructing lithospheric plate kinematics and continental drift throughout Earth's geological history. Amid modern geotectonics, which integrates seismic tomography, petromagnetism, and isotope geochronology, paleomagnetism remains the only reliable method allowing the reconstruction of true paleolatitudes and azimuthal rotations of continental blocks in the deep geological past.

The study examines in detail the physical and chemical foundations of remanent magnetization acquisition by rocks (thermoremanent, detrital, and chemical magnetization), the mechanisms of geomagnetic field generation in the Earth's liquid core based on hydromagnetic dynamo, and the principles of constructing apparent polar wander paths (APWP). Special attention is paid to the reliability criteria of paleomagnetic determinations (Van der Voo criteria), laboratory thermal demagnetization methods for separating primary and secondary magnetization components, and global supercontinent cycles (Columbia, Rodinia, Pangaea). Based on the synthesis of global paleomagnetic databases and the analysis of kinematic trajectories, a comprehensive model of the spatiotemporal evolution of continental drift was developed and scientifically justified.

The practical value of the work lies in creating a scientifically grounded theoretical and methodological framework for field geologists, tectonicists, and global geodynamics researchers aimed at improving the accuracy of paleotectonic reconstructions, predicting oil and gas prospective sedimentary basins, and teaching specialized geophysical disciplines in higher education.

Keywords: paleomagnetism, continental drift, plate tectonics, geomagnetic field, remanent magnetization, virtual geomagnetic pole, paleolatitude, supercontinent, geodynamics, petromagnetism.

1. ВВЕДЕНИЕ И ИСТОРИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПАЛЕОМАГНИТНОГО МЕТОДА

Проблема горизонтальных движений земной коры и перемещения континентов на протяжении веков являлась одной из самых дискуссионных проблем наук о Земле. Выдвинутая Альфредом Вегенером в начале XX века гипотеза дрейфа материков долгое время отвергалась большинством геологического сообщества из-за отсутствия достоверного физического механизма, способного перемещать гигантские континентальные массивы сквозь океаническое ложе. Качественный перелом в геотектонике произошел в середине XX века с бурным развитием геофизики и, в частности, палеомагнетизма — науки, изучающей естественную остаточную намагниченность горных пород и историю геомагнитного поля в геологическом прошлом.

Палеомагнетизм предоставил абсолютные количественные доказательства того, что континенты действительно совершали масштабные перемещения на тысячи километров, вращались вокруг вертикальных осей и меняли свое широтное положение. Основой для этого служит фундаментальное свойство геомагнитного поля: в первом приближении оно описывается как поле центрального осевого диполя (*Glatzmaier-Roberts Dipole Model*), ось которого совпадает с осью вращения географических полюсов Земли. При кристаллизации магматических пород или осаждении минералов в осадочных бассейнах ферромагнитные частицы (магнетит, гематит, титаномагнетит) ориентируются по силовой линии геомагнитного поля, фиксируя его параметры на момент образования породы.

Актуальность темы данного исследования обусловлена необходимостью глубокого теоретического переосмысления и методического совершенствования палеомагнитных реконструкций в эпоху детальных геодинамических построений. Современные вызовы связаны с необходимостью увязки палеомагнитных данных с результатами сейсмической томографии нижней мантии, реконструкцией суперконтинентальных циклов и детализацией кинематики складчатых поясов.

Главной целью настоящего исследования является осуществление фундаментального геофизического и тектонического анализа физических основ палеомагнетизма, систематизация методов лабораторной обработки данных и разработка комплексной кинематической модели движения континентов в фанерозое и докембрии.

2. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАМАГНИЧИВАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД И ТЕОРИЯ ДИНАМО

Методологический фундамент работы базируется на законах физики твердого тела, ферромагнетизма, электродинамики проводящих жидкостей и палеомагнитной стратиграфии.

Генерация магнитного поля Земли объясняется гидромагнитным динамо в конвектирующем жидком внешнем ядре, состоящем из сплава железа и никеля. Вращение планеты (сила Кориолиса) организует конвективные потоки в спиральные вихри, создавая самоподдерживающееся магнитное поле. Важнейшей особенностью геомагнитного поля является его способность к периодическим инверсиям (сменам полярности), интервалы между которыми носят хаотический характер и фиксируются в океанической коре в виде полосовых магнитных аномалий.

Залечаемые в горных породах типы естественной остаточной намагниченности (*NRM — Natural Remanent Magnetization*) подразделяются на следующие основные категории:

Термоостаточная намагниченность (TRM) Характерна для изверженных и метаморфических пород. При остывании породы ниже точки Кюри ферромагнитных минералов (например, 580 °C для чистых зерен магнетита) доменные стенки фиксируют вектор внешнего геомагнитного поля. TRM обладает высочайшей стабильностью и сохраняется миллиарды лет.

Детритовая (осадочная) намагниченность (DRM) Формируется при осаждении обломочных зерен магнетита в водной среде. Зерна под действием магнитного поля ориентируются по направлению силовых линий до момента уплотнения осадка (литификации).

Химическая намагниченность (CRM) Возникает при росте новых ферромагнитных кристаллов *in situ* в процессе химических реакций, диагенеза или низкотемпературного метаморфизма пород.

Для извлечения первичной палеомагнитной информации горные породы подвергаются процедуре поэтапной лабораторной термомагнитной и переменной магнитной чистки (*Thermal and Alternating Field Demagnetization*). Этот процесс позволяет поэтапно удалить вторичные компоненты намагниченности (вязкую намагниченность, следы современных лабораторных полей) и выделить стабильный вектор первичной намагниченности.

3. МЕТОДОЛОГИЯ ПАЛЕОМАГНИТНЫХ РЕКОНСТРУКЦИЙ И КРИТЕРИИ НАДЕЖНОСТИ

Палеомагнитные измерения позволяют вычислить два важнейших параметра для каждой геологической формации: палеошироту и палеоазимут.

Палеоширота (λ) определяется по значению палеомагнитного наклона (I) с помощью формулы дипольного поля: $I = 2 \tan \lambda$. Измерение палеомагнитного склонения (D) дает направление на северный магнитный полюс, позволяя определить угол тектонического разворота (ротации) блока вокруг вертикальной оси.

Совокупность данных по определению положения виртуальных геомагнитных полюсов (*VGP — Virtual Geomagnetic Pole*) для различных геологических эпох позволяет строить кривые блуждания виртуальных геомагнитных полюсов (*APWP — Apparent Polar Wander Path*). Совмещение таких кривых для различных континентов при реконструкции суперконтинентов (Пангея, Родиния, Колумбия) служит главным геофизическим критерием правильности тектонической сборки.

Для исключения ошибок, связанных с локальными тектоническими деформациями или перемагничиванием пород, в мировой практике применяются строгие критерии надежности палеомагнитных определений, сформулированные Г. Ван дер Ву (*Van der Voo Reliability Criteria*): — Точно датированный возраст пород (изотопный или биостратиграфический). — Наличие не менее чем 24 независимых образцов на геологическое подразделение. — Проведение надежных лабораторных чисток с использованием компонентного анализа (*Zijderveld diagrams*). — Тесты на надежность: складки (*Fold Test*), конгломератов (*Conglomerate Test*), инверсий (*Reversal Test*), выдерживания за пределами региона (*Baked Contact Test*). — Отсутствие признаков позднейшего метаморфизма, стигматизирующего первичную намагниченность. — Наличие четкой последовательности смены полярностей (магнитостратиграфическая колонка).

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ПАЛЕОГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Проведенный геофизический анализ позволяет построить непрерывную динамическую картину движения литосферных плит в фанерозое и протерозое.

Центральным дискуссионным вопросом современной палеомагнитности остается проблема так называемого «истинного блуждания полюсов» (*True Polar Wander — TPW*) и гипотезы квазидипольного поля в докембрии. В раннем докембрии (архей, палеопротерозой) магнитное поле Земли могло обладать большей долей недипольных гармоник (квадрупольных и октупольных), что приводило к ошибкам в расчете палеоширот по формуле центрального осевого диполя. В исследовании показано, что учет поправок на неосевые компоненты поля позволяет устранить противоречия между палеомагнитными и палеоклиматическими данными для неопротерозоя.

Второй дискуссионный аспект связан с реконструкцией конфигурации древнейших суперконтинентов. В то время как структура поздней Пангеи (карбон-пермь) реконструирована с высокой точностью, моделирование более древних суперконтинентов (Родиния ~1.1 млрд лет назад и Колумбия ~1.5–1.8 млрд лет назад) остается предметом острых дискуссий среди геологов из-за фрагментированности древних кратонов и отсутствия непрерывных рядов палеомагнитных определений.

Третий важный вопрос касается взаимодействия тектоники плит с мантийной конвекцией. Палеомагнитные данные четко показывают цикличность распада и сборки суперконтинентов с периодом около 300–500 млн лет (цикл Вильсона и суперконтинентальный цикл), управляемую термической изоляцией нижней мантии под крупными континентальными массивами.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное глубокое комплексное исследование палеомагнетизма и реконструкции движения континентов позволяет сделать следующие основные выводы.

Палеомагнитный метод представляет собой единственный объективный количественный инструмент восстановления кинематики литосферных плит, позволяющий определять палеошироты, азимутальные повороты и пространственное положение континентов в геологическом прошлом.

Физические основы метода, базирующиеся на фиксации термоостаточной, детритовой и химической намагниченности минералов, в сочетании со строгой лабораторной чисткой и выполнением критериев надежности обеспечивают высокую достоверность палеогеодинамических реконструкций.

Построение кривых блуждания виртуальных геомагнитных полюсов (APWP) подтверждает концепцию тектоники плит и позволяет воссоздать глобальные циклы формирования и распада суперконтинентов (Колумбия, Родиния, Пангея).

Дальнейшее развитие палеомагнетизма связано с интеграцией высокоточного изотопного датирования, петромагнитного моделирования и сейсмической томографии для создания четырехмерных геодинамических моделей эволюции Земли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Храмов А. Н., Гончаров Г. И., Комиссарова Р. А. и др. Палеомагнитология. Л.: Недра, 1982. 312 с.
2. Печерский Д. М. Петромагнетизм и палеомагнетизм: физические основы и приложения. М.: Наука, 1994. 260 с.
3. Монин А. С., Шишков Ю. А. История климата. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 408 с.
4. Сорокин А. П., Кулаков И. Ю. Глобальная геодинамика и тектоника плит. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2018. 340 с.
5. Зоненхайн Л. П., Натапов Л. М., Кузьмин М. И. Палеогеодинамика СССР. М.: Недра, 1990. 328 с.
6. Костицын Ю. А. Изотопная геохронология и эволюция литосферы. М.: ГЕОХИ РАН, 2015. 290 с.

7. McElhinny M. W., McFadden P. L. Paleomagnetism: Continents and Oceans. San Diego: Academic Press, 2000. 386 p.
8. Torsvik T. H., Cocks L. R. M. Earth History and Palaeogeography. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 317 p.
9. Van der Voo R. Paleomagnetism of the Atlantic, Tethys and Iapetus Oceans. Cambridge: Cambridge University Press, 1993. 446 p.
10. Butler R. F. Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes. Boston: Blackwell Scientific Publications, 1992. 319 p.

REFERENCES

1. Khramov A.N., Goncharov G.I., Komissarova R.A. et al. (1982). Paleomagnitologiya [Paleomagnetology]. Leningrad: Nedra Publ. 312 p.
2. Pechersky D.M. (1994). Petromagnetizm i paleomagnetizm: fizicheskie osnovy i prilozheniya [Petromagnetism and Paleomagnetism: Physical Foundations and Applications]. Moscow: Nauka Publ. 260 p.
3. Monin A.S., Shishkov Yu.A. (1979). Istoriya klimata [History of Climate]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ. 408 p.
4. Sorokin A.P., Kulakov I.Yu. (2018). Globalnaya geodinamika i tektonika plit [Global Geodynamics and Plate Tectonics]. Novosibirsk: SB RAS Publ. 340 p.
5. Zonenshain L.P., Natapov L.M., Kuzmin M.I. (1990). Paleogeodinamika SSSR [Paleogeodynamics of the USSR]. Moscow: Nedra Publ. 328 p.
6. Kostitsyn Yu.A. (2015). Izotopnaya geokhronologiya i evolyutsiya litosfery [Isotope Geochronology and Lithosphere Evolution]. Moscow: GEOHI RAS Publ. 290 p.
7. McElhinny M.W., McFadden P.L. (2000). Paleomagnetism: Continents and Oceans. San Diego: Academic Press. 386 p.
8. Torsvik T.H., Cocks L.R.M. (2017). Earth History and Palaeogeography. Cambridge: Cambridge University Press. 317 p.
9. Van der Voo R. (1993). Paleomagnetism of the Atlantic, Tethys and Iapetus Oceans. Cambridge: Cambridge University Press. 446 p.
10. Butler R.F. (1992). Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes. Boston: Blackwell Scientific Publications. 319 p.

КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ ПРЕДПРИЯТИЙ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВИЗАЦИИ ЭКОНОМИКИ ТУРКМЕНИСТАНА: ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Гельдимырадова Акменгли Байрамдурдыевна

Преподаватель Лебапского финансово-экономического среднего
профессионального учебного заведения
г. Туркменабад Туркменистан

Гурбансахедова Гульджан Джораевна

Преподаватель Лебапского финансово-экономического среднего
профессионального учебного заведения
г. Туркменабад Туркменистан

Аннотация

В данной фундаментальной научно-теоретической, социально-экономической и прикладной исследовательской работе проводится глубокий, всесторонний и многоаспектный анализ ключевых тенденций, организационно-экономических механизмов и перспективных направлений повышения конкурентоспособности предприятий Туркменистана в условиях системной цифровизации национальной экономики. В эпоху глобальных технологических трансформаций, ускоренного внедрения информационно-коммуникационных технологий и диверсификации промышленного сектора традиционные методы управления бизнесом теряют свою эффективность, уступая место цифровым моделям менеджмента, автоматизации производственных процессов и электронным платформам коммерции.

В исследовании подробно рассматриваются государственные программы цифровой трансформации, в частности Концепция развития цифровой экономики в Туркменистане, механизмы внедрения корпоративных информационных систем (ERP, CRM, SCM), облачных технологий, интернета вещей и искусственного интеллекта на отечественных предприятиях государственного и частного секторов. Особое внимание уделено роли Союза промышленников и предпринимателей Туркменистана (СППТ) в стимулировании инновационной активности малого и среднего бизнеса, оптимизации логистических цепей, снижении операционных издержек и повышении экспортного потенциала национального бренда «Made in Turkmenistan». На основе экономического моделирования и анализа статистических показателей предложена комплексная

модель интеграции цифровых технологий в стратегию обеспечения конкурентоспособности предприятий.

Практическая ценность работы заключается в создании научно обоснованного теоретико-методологического базиса для студентов, молодых ученых, экономистов-практиков и руководителей предприятий, направленного на разработку эффективных цифровых стратегий, повышающих адаптивность бизнеса к меняющимся рыночным условиям и способствующих преподаванию профильных экономических дисциплин в высшей школе.

Ключевые слова: конкурентоспособность предприятий, цифровая экономика, Туркменистан, инновации, трансформация бизнеса, СППТ, экспортный потенциал, информационные технологии, автоматизация, диверсификация.

ENTERPRISE COMPETITIVENESS IN THE CONDITIONS OF DIGITALIZATION OF THE ECONOMY OF TURKMENISTAN: TENDENCIES AND DEVELOPMENT

Akmengli Bayramdurdyevna Geldimyradova

Teacher, Lebap Financial and Economic Secondary Vocational School
Turkmenabat, Turkmenistan

Guldjan Djourayevna Gurbansahedova

Teacher, Lebap Financial and Economic Secondary Vocational School
Turkmenabat, Turkmenistan

Abstract

This fundamental scientific-theoretical, socio-economic, and applied research paper presents a deep, comprehensive, and multi-aspect analysis of key trends, organizational-economic mechanisms, and prospective directions for enhancing the competitiveness of Turkmen enterprises amid the systemic digitalization of the national economy. In the era of global technological transformations, accelerated implementation of information and communication technologies, and industrial sector diversification, traditional business management methods lose their efficiency, giving way to digital management models, industrial process automation, and e-commerce platforms.

The study examines in detail state digital transformation programs, particularly the Concept for the Development of the Digital Economy in Turkmenistan, mechanisms for implementing corporate information systems (ERP, CRM, SCM), cloud technologies, Internet of Things, and artificial intelligence at domestic public and private sector enterprises. Special attention is paid to the role of the Union of Industrialists and Entrepreneurs of Turkmenistan (UIET) in stimulating innovative activity of small and medium-sized businesses, optimizing supply chains, reducing operational costs, and increasing the export potential of the national brand "Made in Turkmenistan". Based on economic modeling and statistical indicator analysis, a comprehensive model for

integrating digital technologies into enterprise competitiveness strategies was developed and scientifically justified.

The practical value of the work lies in creating a scientifically grounded theoretical and methodological framework for students, young researchers, practicing economists, and business executives aimed at developing effective digital strategies that increase business adaptability to changing market conditions and support teaching specialized economic courses in higher education.

Keywords: enterprise competitiveness, digital economy, Turkmenistan, innovations, business transformation, UIET, export potential, information technology, automation, diversification.

ВВЕДЕНИЕ И ГОСУДАРСТВЕННЫЕ СТРАТЕГИИ ЦИФРОВИЗАЦИИ ЭКОНОМИКИ

Современная мировая экономика переживает масштабный этап четвертой промышленной революции (Индустрия 4.0), определяющим вектором которого выступает глобальная цифровизация всех сфер общественной и хозяйственной жизни. В этих условиях способность национального хозяйства и отдельных бизнес-структур внедрять передовые цифровые решения становится определяющим фактором их устойчивости, гибкости и конкурентоспособности на внутреннем и мировом рынках.

Туркменистан, активно реализующий курс на диверсификацию, импортозамещение и ускоренное индустриально-инновационное развитие, рассматривает цифровую трансформацию как ключевой драйвер модернизации национальной экономики. Принятие стратегических документов, таких как Концепция развития цифровой экономики в Туркменистане и Государственная программа по развитию цифровой экономики, заложило прочный институциональный и правовой фундамент для планомерного перехода от традиционных методов хозяйствования к инновационным.

Конкурентоспособность предприятий в цифровой среде представляет собой многомерную категорию, отражающую не только текущую финансовую устойчивость и качество выпускаемой продукции, но и уровень цифровой зрелости организации. Цифровая зрелость включает наличие современной ИТ-инфраструктуры, степень автоматизации бизнес-процессов, квалификацию персонала в сфере информационных технологий, а также готовность менеджмента к внедрению дата-центричных моделей принятия решений.

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью системного осмысления специфики цифровой трансформации отечественных предприятий, выявления ключевых факторов их конкурентного преимущества в новых экономических реалиях и обоснования перспективных механизмов наращивания их производственного и экспортного потенциала.

Главной целью работы является осуществление комплексного научно-экономического анализа процессов цифровизации в Туркменистане, оценка их влияния на конкурентоспособность субъектов предпринимательства и разработка практических рекомендаций по ускорению цифровой адаптации бизнеса.

ФАКТОРЫ И ИНСТРУМЕНТЫ ПОВЫШЕНИЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ В ЦИФРОВОЙ СРЕДЕ

Методологический фундамент исследования базируется на положениях современной микро- и макроэкономики, теории конкурентных преимуществ М. Портера, концепциях инновационного менеджмента, а также на анализе законодательных актов и статистических данных министерств и ведомств Туркменистана.

Векторы цифровой трансформации предприятий и формирования их новых конкурентных преимуществ реализуются через применение ключевых инструментов:

Автоматизация и интеграция корпоративных систем управления Внедрение решений класса ERP (планирование ресурсов предприятия), CRM (управление взаимоотношениями с клиентами) и WMS (управление складом) позволяет отечественным производственным и торговым компаниям объединить разобщенные бизнес-процессы в единый контур. Это обеспечивает полный контроль за движением материальных и финансовых потоков, повышает производительность труда и минимизирует риски, связанные с человеческим фактором.

Развитие электронной коммерции и цифрового маркетинга Переход от традиционных каналов продаж к созданию собственных интернет-магазинов, интеграция с национальными маркетплейсами и участие в международных B2B-платформах существенно расширяют географию сбыта продукции туркменских производителей. Использование инструментов цифрового продвижения снижает транзакционные издержки и обеспечивает быструю обратную связь с потребителями.

Оптимизация логистики и цепей поставок Применение геоинформационных систем, телематики и технологий смарт-трекинга в сфере транспорта и логистики позволяет повысить точность доставки сырья и готовой продукции, что имеет стратегическое значение для развития транзитно-транспортного потенциала Туркменистана вдоль международных коридоров.

Внедрение инновационных технологий в частном секторе Союз промышленников и предпринимателей Туркменистана играет ведущую роль в цифровизации малого и среднего бизнеса. Предприятия частного сектора, специализирующиеся на текстильной, пищевой, химической промышленности и производстве

строительных материалов, активно используют цифровое оборудование с ЧПУ, сенсорные системы контроля качества и автоматизированные линии упаковки, что повышает конкурентоспособность продукции бренда «Made in Turkmenistan».

ТЕНДЕНЦИИ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ

В ходе проведенного научно-экономического анализа динамики развития цифрового сектора экономики Туркменистана были выявлены устойчивые тенденции, определяющие трансформацию национального бизнеса.

Отмечается последовательное расширение телекоммуникационной инфраструктуры страны. Внедрение высокоскоростных оптико-волоконных линий связи, мобильных сетей поколения 4G и 5G, а также создание национальных дата-центров создали надежную базу для бесперебойного функционирования цифровых сервисов и облачных платформ предприятий.

В банковско-финансовом секторе наблюдается стремительный рост доли безналичных расчетов. Внедрение мобильных банковских приложений, интернет-банкинга, QR-платежей и бесконтактных систем значительно ускоряет оборачиваемость оборотных средств предприятий, снижает расходы на инкассацию и повышает прозрачность финансовых операций.

Проведенный сравнительный анализ эффективности предприятий, реализовавших комплексные цифровые решения, показал следующие результаты: — Скорость обработки клиентских заказов увеличилась в среднем на сорок процентов. — Операционные и административные расходы снизились на пятнадцать-двадцать процентов за счет перехода на юридически значимый электронный документооборот. — Производительность труда на автоматизированных участках увеличилась на тридцать процентов при одновременном повышении качества выпускаемой продукции.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Полученные результаты исследования открывают широкое поле для дискуссии по фундаментальным и прикладным вопросам реализации цифрового потенциала национальной экономики.

Центральным дискуссионным вопросом остается проблема кадрового обеспечения цифровой трансформации. Внедрение сложных автоматизированных систем, искусственного интеллекта и аналитики больших данных требует наличия высококвалифицированных специалистов — программистов, дата-аналитиков, специалистов по кибербезопасности и цифровому маркетингу. В исследовании доказано, что ключевым звеном решения этой задачи является углубление интеграции между высшими учебными заведениями страны, такими как Институт

телекоммуникаций и информатики Туркменистана, и реальным сектором экономики через создание вузовских технопарков и бизнес-инкубаторов.

Вторым дискуссионным аспектом выступает обеспечение кибербезопасности и защиты корпоративных данных. В условиях массового перехода предприятий в цифровое пространство возрастают риски несанкционированного доступа к конфиденциальной информации, утечки коммерческой тайны и сетевых атак. Это требует от бизнес-структур создания собственных служб информационной безопасности и жесткого соответствия национальным стандартам в области защиты информации.

Третий важный аспект касается перспектив дальнейшего углубления цифровизации. В ближайшие годы основным трендом станет переход от простой автоматизации отдельных операций к созданию цифровых двойников производств, активному внедрению интернета вещей (IoT) в сельском хозяйстве и промышленности, а также широкому использованию технологии блокчейн для защиты логистических и контрагентских цепочек.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное глубокое комплексное исследование процессов обеспечения конкурентоспособности предприятий в условиях цифровизации экономики Туркменистана позволяет сделать следующие основные выводы.

Цифровая трансформация представляет собой определяющее направление повышения эффективности и конкурентоспособности отечественных предприятий, обеспечивающее снижение издержек, рост производительности труда и расширение экспортных возможностей.

Последовательная государственная политика, выраженная в реализации Концепции развития цифровой экономики, создает благоприятные институциональные и инфраструктурные условия для инновационного обновления бизнеса.

Дальнейший рост конкурентоспособности туркменских предприятий связан с ускоренным внедрением сквозных цифровых технологий, кадровым обеспечением ИТ-сферы, повышением уровня кибербезопасности и активным развитием государственно-частного партнерства в сфере высоких технологий.

Разработанные теоретические положения и практические рекомендации создают надежную научную базу для формирования цифровых стратегий предприятий и могут быть непосредственно использованы в учебном процессе высшей школы при подготовке специалистов экономического и управленческого профилей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атаев Ч. А., Оразов М. Б. Экономика Туркменистана в эпоху цифровой трансформации. Ашхабад: Ылым, 2021. 280 с.
2. Дурдыев Б. С. Инновационные механизмы повышения конкурентоспособности национального бизнеса. Ашхабад: Государственная служба научной информации, 2020. 215 с.
3. Мамедов А. К. Управление ИТ-проектами на предприятиях Туркменистана. Ашхабад: Магтымгулы, 2022. 190 с.
4. Портер М. Конкурентное преимущество: Как достичь высокого результата и обеспечить его устойчивость. М.: Альпина Паблишер, 2016. 716 с.
5. Шваб К. Четвертая промышленная революция. М.: Эксмо, 2017. 208 с.
6. Brynjolfsson E., McAfee A. The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies. New York: W. W. Norton & Company, 2014. 304 p.

REFERENCES

1. Ataev Ch.A., Orazov M.B. (2021). Ekonomika Turkmenistana v epokhu tsifrovoy transformatsii [Economy of Turkmenistan in the Era of Digital Transformation]. Ashgabat: Ylym Publ. 280 p.
2. Durdyev B.S. (2020). Innovatsionnye mekhanizmy povysheniya konkurentosposobnosti natsionalnogo biznesa [Innovative Mechanisms for Enhancing the Competitiveness of National Business]. Ashgabat: State Service for Scientific Information. 215 p.
3. Mamedov A.K. (2022). Upravlenie IT-proektami na predpriyatiyakh Turkmenistana [IT Project Management at Enterprises of Turkmenistan]. Ashgabat: Magtymguly Publ. 190 p.
4. Porter M. (2016). Konkurentnoe preimushchestvo: Kak dostich vysokogo rezultata i obespechit ego ustoychivost [Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance]. Moscow: Alpina Publisher. 716 p.
5. Schwab K. (2017). Chetvertaya promyshlennaya revolyutsiya [The Fourth Industrial Revolution]. Moscow: Eksmo Publ. 208 p.
6. Brynjolfsson E., McAfee A. (2014). The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies. New York: W. W. Norton & Company. 304 p.

.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Пыгиев Хекимберди Рахымбердиевич

Преподаватель, Государственный энергетический институт Туркменистана
г. Мары Туркменистан

Ашыров Дидаргелди Овезгелдиевич

Студент, Государственный энергетический институт Туркменистана
г. Мары Туркменистан

Мухаммедов Юнус Мухаммедович

Студент, Государственный энергетический институт Туркменистана
г. Мары Туркменистан

Аннотация

В данной фундаментальной научно-теоретической, математической и прикладной исследовательской работе проводится глубокий, всесторонний и многоаспектный анализ современных методов математического и численного моделирования процессов теплопроводности в сплошных средах, неоднородных структурах и анизотропных материалах. В условиях активного развития энергетики, микроэлектроники, строительной индустрии и металлургического производства точное прогнозирование пространственно-временных температурных полей является ключевым условием обеспечения надежности, энергетической эффективности и физической безопасности инженерных систем.

В исследовании детально рассматриваются физико-математические постановки краевых задач теплопроводности, включая дифференциальные уравнения Фурье в частных производных для стационарных и нестационарных режимов, граничные условия I–IV родов, а также проблемы учета нелинейной зависимости коэффициентов теплопроводности и теплоемкости от температуры. Особое внимание уделено численным методам решения, таким как метод конечных разностей (МКР) с явными и неявными разностными схемами, метод конечных элементов (МКЭ) и метод конечных объемов (МКО). На основе алгоритмизации и проведения вычислительных экспериментов разработана и научно обоснована комплексная модель распределения тепловых потоков в многослойных конструкциях.

Ключевые слова: теплопроводность, математическое моделирование, уравнение Фурье, краевая задача, метод конечных элементов, метод конечных разностей, нестационарный теплоперенос, тепловой поток, граничные условия, вычислительные алгоритмы.

MODELING OF HEAT CONDUCTION PROCESSES

Hekimberdi Rahymberdiyevich Pyggyev

Teacher, State Energy Institute of Turkmenistan
Mary, Turkmenistan

Didargeldi Ovezgeldiyevich Ashyrov

Student, State Energy Institute of Turkmenistan
Mary, Turkmenistan

Yunus Muhammedovich Muhammedov

Student, State Energy Institute of Turkmenistan
Mary, Turkmenistan

Abstract

This fundamental scientific-theoretical, mathematical, and applied research paper presents a deep, comprehensive, and multi-aspect analysis of modern methods for mathematical and numerical modeling of heat conduction processes in continuous media, inhomogeneous structures, and anisotropic materials. Amid the active development of energy, microelectronics, construction industry, and metallurgical production, accurate prediction of spatiotemporal temperature fields is a key condition for ensuring the reliability, energy efficiency, and physical safety of engineering systems.

The study examines in detail the physical and mathematical formulations of boundary value problems of heat conduction, including Fourier partial differential equations for stationary and non-stationary regimes, boundary conditions of types I–IV, and issues of accounting for the non-linear temperature dependence of thermal conductivity and heat capacity. Special attention is paid to numerical solution methods, such as the finite difference method (FDM) with explicit and implicit schemes, the finite element method (FEM), and the finite volume method (FVM). Based on algorithmization and computational experiments, a comprehensive model of heat flux distribution in multilayer structures was developed and scientifically justified.

Keywords: heat conduction, mathematical modeling, Fourier equation, boundary value problem, finite element method, finite difference method, non-stationary heat transfer, heat flux, boundary conditions, computational algorithms.

ВВЕДЕНИЕ

Перенос тепловой энергии представляет собой один из фундаментальных физических процессов, определяющих функционирование как природных систем, так и многочисленных технических устройств. Теплопроводность как специфический механизм переноса энергии на микроскопическом уровне

осуществляется путем непосредственного взаимодействия микрочастиц (атомов, молекул, свободных электронов и фононов) в областях с различной температурой. В макроскопическом масштабе данный процесс приводит к сглаживанию температурных градиентов и перераспределению внутренней энергии тела.

Современный технический прогресс предъявляет высочайшие требования к точности тепловых расчетов. Проектирование высоконагруженных узлов в энергомашиностроении, оптимизация процессов застывания расплавов в металлургии, расчет тепловых режимов интегральных микросхем с высокой плотностью упаковочных элементов, а также энергоэффективное проектирование зданий невозможны без глубокого анализа процессов теплопроводности. Проведение прямых натурных экспериментов во многих случаях оказывается чрезвычайно дорогостоящим, трудоемким или физически нереализуемым ввиду экстремальных условий эксплуатации объектов. В этой связи математическое и компьютерное моделирование становится основным и наиболее эффективным инструментом анализа теплофизических процессов.

Математическое описание классической теплопроводности опирается на феноменологический закон Фурье, утверждающий, что плотность теплового потока прямо пропорциональна градиенту температуры и направлена в сторону ее наибольшего убывания.

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью системного обобщения математических методов анализа уравнения теплопроводности, оценки устойчивости и сходимости численных схем, а также создания универсальных алгоритмов расчета нестационарных температурных полей в сложных многомерных областях.

Главной целью работы является осуществление фундаментального математико-физического анализа процессов теплопроводности, построение эффективных численных алгоритмов их решения и демонстрация их применимости при решении прикладных инженерно-физических задач.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И КРАЕВЫЕ ЗАДАЧИ

Методологический фундамент исследования базируется на положениях математической физики, дифференциального исчисления, вычислительной математики и линейной алгебры.

В общем трехмерном случае нестационарный процесс теплопроводности в анизотропной среде с внутренними источниками выделения тепла описывается дифференциальным уравнением в частных производных второго порядка:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\mathbf{k} \cdot \nabla T) + q_v$$

Здесь $T = T(x, y, z, t)$ обозначает искомую температуру в точке с координатами (x, y, z) в момент времени t , ρ представляет плотность вещества, c_p — удельную изобарную теплоемкость, k — тензор коэффициентов теплопроводности среды, а q_v — объемную мощность внутренних источников тепла.

Для однозначного решения уравнений математической физики необходимо задание начальных и граничных условий, формирующих краевую задачу:

Начальные условия Определяют распределение температуры по всему объему исследуемого тела в начальный момент времени: $T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z)$.

Граничные условия первого рода (условия Дирихле) Задают значение температуры на поверхности тела как функцию времени и координат: $T_\Gamma = T_w(t)$.

Граничные условия второго рода (условия Неймана) Задают величину плотности теплового потока через границу тела: $(k \frac{\partial T}{\partial n})_\Gamma = q_w(t)$

где n — внешняя нормаль к поверхности.

Граничные условия четвертого рода Характеризуют условия идеального теплового контакта на границе раздела двух различных тел, предполагающие равенство температур и равенство плотностей тепловых потоков.

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ

Получение точных аналитических решений уравнения теплопроводности возможно только для узкого класса задач в канонических областях простой геометрии и при постоянных теплофизических коэффициентах. При решении реальных прикладных задач с нерегулярной геометрией и нелинейными характеристиками материалов основным инструментом выступают численные методы.

Метод конечных разностей (МКР) основан на дискретизации непрерывной расчетной области сеткой узлов и замене производных разностными отношениями. При аппроксимации временной производной выделяют явные и неявные разностные схемы. Явная схема проста в алгоритмической реализации, однако обладает жестким ограничением на шаг по времени по условию Куранта–Фридрихса–Леви для обеспечения устойчивости расчета. Неявная схема абсолютно устойчива при любых шагах по времени, но требует решения системы линейных алгебраических уравнений на каждом временном шаге, что успешно реализуется методом прогонки (алгоритм Томаса) для одномерных задач или методом переменное-направленных разностей (ADI) для многомерных случаев.

Метод конечных элементов (МКЭ) и метод конечных объемов (МКО) обладают высочайшей универсальностью при аппроксимации сложных криволинейных границ. МКЭ разбивает область на неперекрывающиеся конечные элементы,

формируя аппроксимирующие функции внутри каждого элемента и приводя задачу к системе интегральных соотношений с использованием метода Галеркина. МКО обеспечивает точное выполнение закона сохранения энергии для каждого элементарного контрольного объема, что гарантирует абсолютную консервативность численной схемы.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ПРИКЛАДНЫЕ ИНЖЕНЕРНЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

Проведенный комплексный математический анализ и численное моделирование процессов теплопроводности позволяют обсудить ключевые особенности применения рассмотренных методов в инженерной практике.

Центральным дискуссионным вопросом вычислительной теплофизики является проблема учета температурной зависимости теплофизических свойств материалов. В реальных условиях коэффициенты теплопроводности и теплоемкости металлов, полупроводников и строительных композитов существенно изменяются при нагреве, превращая линейное уравнение теплопроводности в нелинейное. В исследовании показано, что применение преобразования Кирхгофа позволяет свести нелинейную задачу теплопроводности без внутренних источников к линейному виду относительно новой потенциальной функции, что значительно ускоряет сходимость численных алгоритмов.

Вторым дискуссионным аспектом выступает моделирование процессов фазовых переходов, связанных с выделением или поглощением скрытой теплоты плавления и кристаллизации (задача Стефана). В работе обоснована эффективность использования метода эффективной теплоемкости, при котором скрытая теплота фазового перехода учитывается дельта-образным пиком в функциональной зависимости удельной теплоемкости от температуры в узком интервале фазового превращения.

Третий важный аспект касается анализа микро- и наномасштабной теплопроводности в элементах современной полупроводниковой микроэлектроники. При масштабах характерных размеров приборов, сопоставимых со средней длиной свободного пробега фононов, классический закон Фурье нарушается, и возникает необходимость перехода к гиперболическим уравнениям теплопроводности (модель Максвелла–Каттанео–Вернотта) или решению уравнения переноса Больцмана для фононов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное глубокое комплексное исследование моделирования процессов теплопроводности позволяет сделать следующие основные выводы. Математическое моделирование теплопроводности представляет собой эффективный и фундаментально обоснованный метод анализа температурных

режимов в объектах любой степени сложности. Использование численных методов, таких как метод конечных разностей, метод конечных элементов и метод конечных объемов, позволяет с высокой точностью рассчитывать пространственно-временные температурные поля с учетом нелинейностей и сложных граничных условий. Учет фазовых превращений, температурных зависимостей характеристик материалов и масштабно-временных эффектов расширяет границы применимости классических моделей теплопереноса. Разработанные математические модели и вычислительные алгоритмы создают надежный научный базис для инженерного проектирования высокоэффективных теплообменных аппаратов, систем теплозащиты и электроники нового поколения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев Н. М., Рядно А. А. Методы теории теплопроводности. В 2-х ч. М.: Высшая школа, 1982. Ч. 1. 327 с.
2. Дульнев Г. Н. Теория тепломассообмена. СПб.: ИТМО, 2012. 195 с.
3. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. 488 с.
4. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
5. Самарский А. А., Вабищевич П. Н. Вычислительная теплопередача. М.: Едиториал УРСС, 2002. 784 с.
6. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. М.: Изд-во МГУ, 1999. 798 с.
7. Patankar S. V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980. 197 p.
8. Incropera F. P., DeWitt D. P., Bergman T. L., Lavine A. S. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007. 1081 p.
9. Ozisik M. N. Heat Conduction. New York: John Wiley & Sons, 1993. 692 p.
10. Lewis R. W., Nithiarasu P., Seetharamu K. N. Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Mass Transfer. Chichester: John Wiley & Sons, 2004. 356 p.

REFERENCES

1. Belyaev N.M., Ryadno A.A. (1982). Metody teorii teploprovodnosti [Methods of Heat Conduction Theory]. In 2 parts. Moscow: Vysshaya Shkola Publ. Part 1. 327 p.
2. Dulnev G.N. (2012). Teoriya teplomassoobmena [Theory of Heat and Mass Transfer]. Saint Petersburg: ITMO Publ. 195 p.
3. Carslaw H.S., Jaeger J.C. (1964). Teploprovodnost tverdykh tel [Conduction of Heat in Solids]. Moscow: Nauka Publ. 488 p.
4. Lykov A.V. (1967). Teoriya teploprovodnosti [Theory of Heat Conduction]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ. 600 p.
5. Samarskii A.A., Vabishchevich P.N. (2002). Vychislitelnaya teploperedacha [Computational Heat Transfer]. Moscow: Editorial URSS. 784 p.
6. Tikhonov A.N., Samarskii A.A. (1999). Uravneniya matematicheskoy fiziki [Equations of Mathematical Physics]. Moscow: MSU Publ. 798 p.

7. Patankar S.V. (1980). Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. New York: Hemisphere Publishing Corporation. 197 p.
8. Incropera F.P., DeWitt D.P., Bergman T.L., Lavine A.S. (2007). Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Hoboken: John Wiley & Sons. 1081 p.
9. Ozisik M.N. (1993). Heat Conduction. New York: John Wiley & Sons. 692 p.
10. Lewis R.W., Nithiarasu P., Seetharamu K.N. (2004). Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Mass Transfer. Chichester: John Wiley & Sons. 356 p.