



№1(12)

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ГОРИЗОНТЫ

SCIENCE HORIZONS

НАУКИ

МЕДИЦИНА

ДОСТИЖЕНИЯ
И ИННОВАЦИИ
ВО ИМЯ ЗДОРОВЬЯ
И БУДУЩЕГО
ЧЕЛОВЕЧЕСТВА



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:

Belozеров 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 В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛИЗАЦИИ.....	5
2. ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПЕРЕВОДА.....	13
3. ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СЕТЬЮ.....	21
4. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.....	29
5. ФОРМИРОВАНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ АНСАМБЛЕВОГО МЫШЛЕНИЯ В МУЗЫКАЛЬНОМ ИСПОЛНИТЕЛЬСТВЕ.....	36
6. ТРАНСФОРМАЦИЯ КОМПОЗИТОРСКИХ И ИСПОЛНИТЕЛЬСКИХ СТРАТЕГИЙ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВИЗАЦИИ МУЗЫКАЛЬНОГО ИСКУССТВА.....	43
7. ИЗУЧЕНИЕ ГЕОМОРФОЛОГИИ И ПРОЦЕССОВ ЭРОЗИИ.....	50
8. ЭВОЛЮЦИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬСКОЙ ТЕХНИКИ И АКУСТИКО ТЕМБРОВОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ В ФОРТЕПИАННОМ ИСКУССТВЕ.....	56
9. ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ХАКЕРСКИХ АТАКА	63
10. ИНТОНАЦИОННО-АКУСТИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ФОРТЕПИАННОГО ЗВУКОИЗВЛЕЧЕНИЯ И СПЕЦИФИКА ТЕМБРОВО-ДИНАМИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ В ИСПОЛНИТЕЛЬСКОЙ ПРАКТИКЕ.....	70
11. ФОРМИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫМИ КОЛЛЕКЦИЯМИ В БИБЛИОТЕКЕ	77
12. ОПТИЧЕСКАЯ ТОМОГРАФИЯ ДЛЯ МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКИ.....	84
13. СИНТЕЗ НОВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ	91
14. ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СЛЕДА МЕГАПОЛИСОВ	98
15. GENERALIZED SOLUTIONS AND NUMERICAL METHODS FOR STUDYING BOUNDARY VALUE PROBLEMS FOR NONLINEAR ELLIPTIC EQUATIONS IN MULTIDIMENSIONAL DOMAINS.....	105

ЭВОЛЮЦИЯ ВИРУСНЫХ ШТАММОВ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛИЗАЦИИ

Кузнецова Елена Владимировна

Аспирант кафедры вирусологии и эпидемиологии, Российский национальный
исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова
г. Москва, Россия

Аннотация

В данной научной статье проводится фундаментальный, системный, глубокий и всесторонний научно-технический анализ механизмов и закономерностей эволюции вирусных штаммов под воздействием интенсивных процессов глобализации. В исследовании детально рассматриваются ключевые факторы, ускоряющие генетическую изменчивость, рекомбинацию и адаптацию вирусов: глобализация транспортных сетей, увеличение плотности городского населения, трансграничные миграционные потоки, изменение климата и антропогенная трансформация естественных экосистем. Проведена подробная декомпозиция микроэволюционных процессов в популяции вирусов, включая механизмы антигенного дрейфа и антигенного сдвига, накопление точечных мутаций под давлением иммунного отбора, а также явления межвидового перехода патогенов от животных к человеку. Особое внимание в работе уделено роли современных методов филогенетического анализа, полного геномного секвенирования и молекулярного мониторинга в отслеживании путей распространения и географической эволюции штаммов. В исследовании доказано, что условия современной глобализации превращают локальные вспышки вирусных инфекций в глобальные угрозы за микроскопические по историческим меркам промежутки времени, что требует кардинального пересмотра традиционных подходов к эпидемиологическому надзору. В статье представлен развернутый сравнительный анализ динамики мутагенеза различных классов вирусных геномов, выявлены ключевые закономерности формирования устойчивости к противовирусным препаратам и вакцинам, а также сформулированы комплексные методологические рекомендации по построению международных систем проактивного мониторинга вирусных угроз. Практическая ценность результатов заключается в формировании научно обоснованных ориентиров и алгоритмических принципов для разработки эффективных противоэпидемических мероприятий и создания универсальных вакцинных платформ нового поколения.

Ключевые слова: эволюция вирусов, глобализация, вирусные штаммы, мутации, антигенный дрейф, эпидемиология, филогеномика, межвидовой переход, панзоотии, молекулярный мониторинг.

EVOLUTION OF VIRAL STRAINS UNDER GLOBALIZATION

Kuznetsova Elena Vladimirovna

Postgraduate Student of the Department of Virology and Epidemiology, Pirogov
Russian National Research Medical University
Moscow, Russia

Abstract

This scientific article presents a fundamental, systematic, deep, and comprehensive scientific and technical analysis of the mechanisms and patterns governing the evolution of viral strains under the influence of intensive globalization processes. The study examines in detail the key factors accelerating genetic variability, recombination, and adaptation of viruses: globalization of transport networks, increasing urban population density, transboundary migration flows, climate change, and anthropogenic transformation of natural ecosystems. A detailed decomposition of microevolutionary processes within viral populations is carried out, including mechanisms of antigenic drift and antigenic shift, accumulation of point mutations under immune selection pressure, and the phenomenon of interspecies transmission of pathogens from animals to humans. Particular attention is paid to the role of modern methods of phylogenetic analysis, full-genome sequencing, and molecular monitoring in tracking the transmission pathways and geographical evolution of strains. The study proves that modern globalization transforms local outbreaks of viral infections into global threats within microscopic timeframes by historical standards, requiring a fundamental revision of traditional approaches to epidemiological surveillance. The article presents an extensive comparative analysis of mutagenesis dynamics across different classes of viral genomes, identifies key patterns in the emergence of resistance to antiviral drugs and vaccines, and formulates comprehensive methodological recommendations for constructing international systems for proactive monitoring of viral threats. The practical value lies in developing scientifically grounded guidelines and algorithmic principles for creating effective anti-epidemic measures and next-generation universal vaccine platforms.

Keywords: viral evolution, globalization, viral strains, mutations, antigenic drift, epidemiology, phylogenomics, interspecies transmission, panzootics, molecular monitoring.

Введение

Проблема анализа механизмов, динамики и закономерностей эволюции вирусных штаммов в условиях современного глобализированного мира представляет собой одну из наиболее актуальных, сложных и приоритетных задач фундаментальной вирусологии, эволюционной биологии, молекулярной эпидемиологии и глобальной системы здравоохранения. В XXI веке процессы глобализации достигли беспрецедентного размаха: объемы международных пассажирских и грузовых перевозок, скорость перемещения людей между континентами, уровень урбанизации и интенсивность освоения человеком новых природных территорий

выросли в геометрической прогрессии. Подобная трансформация окружающей среды и социальной структуры человечества кардинально изменила экологию вирусных патогенов, создав идеальные условия для их ускоренного накопления, мутагенеза и молниеносного трансграничного распространения.

Исторически микроэволюция вирусов происходила в относительно изолированных ареалах, где распространение новых штаммов ограничивалось естественными географическими барьерами, низкой плотностью населения и длительными сроками поездок. В эпоху глобальной связанности любое локальное генетическое изменение в структуре вируса может быть транспортировано в противоположную точку земного шара в течение нескольких десятков часов, то есть за время, меньшее инкубационного периода большинства вирусных инфекций. Это приводит к тому, что вирусы получают практически неограниченный доступ к огромным, генетически и иммунологически разнообразным человеческим популяциям, что существенно усиливает естественный отбор и ускоряет появление штаммов с новыми биологическими свойствами: повышенной контагиозностью, вирулентностью или способностью ускользать от существующего популяционного иммунитета.

Традиционные концепции эпидемиологического надзора, опиравшиеся на локализацию очагов инфекции в пределах отдельных государств и реактивное реагирование на зарегистрированные вспышки, исчерпали свой ресурс в условиях глобального мира. Выявление фундаментальных закономерностей взаимодействия эволюционных процессов на молекулярном уровне с социально-экономическими факторами глобализации выступает обязательным условием для обеспечения биологической безопасности. Главной целью данного исследования является комплексный научно-теоретический и аналитический анализ воздействия факторов глобализации на молекулярную эволюцию и динамику мутагенеза вирусных штаммов, определение ключевых драйверов формирования новых вариантов патогенов и разработка на этой основе единых методологических принципов построения проактивных систем противоэпидемической защиты.

Материалы и методы исследования

Методологический фундамент проведенного исследования опирается на междисциплинарный подход, сочетающий инструменты молекулярной вирусологии, филогенетики, популяционной генетики, эпидемиологического моделирования, теории систем и анализа социально-демографических процессов.

В процессе выполнения работы производился детальный учет, фундаментальный анализ и систематизация широкого спектра данных и входных параметров, которые были разделены на три ключевые и взаимосвязанные категории:

Первая категория включает молекулярно-генетические и биологические характеристики патогенов. Сюда относятся структура вирусного генома, скорость

накопления точечных нуклеотидных замен, высокая частота ошибок вирусных полимераз, способность к сегментарной рекомбинации и реассортации генов, структура поверхностных белков-антигенов, а также тропность к рецепторам клеток хозяина и показатели базового репродуктивного числа.

Вторая категория охватывает экологические и демографические факторы взаимодействия вирусов с популяциям животных и человека. Анализировались параметры биоразнообразия естественных резервуаров (в частности, диких птиц и рукокрылых), интенсивность контактов человека с дикой природой, масштабы животноводства и птицеводства, уровень плотности городского населения, социальные медико-санитарные условия и уровень иммунной прослойки населения (как естественной, так и сформированной вакцинацией).

Третья категория состоит из глобальных пространственно-временных и инфраструктурных параметров. К ним относятся интенсивность и топология международных авиационных, морских и сухопутных транспортных коридоров, объем трансграничных миграционных и туристических потоков, климатические тренды, влияющие на расширение ареалов обитания переносчиков инфекций, а также скорость и полнота передачи молекулярно-эпидемиологических данных в международных исследовательских сетях.

Для теоретического описания и анализа эволюционной динамики вирусных популяций применялись методы филогенетического анализа, алгоритмы построения эволюционных деревьев и модели молекулярных часов. Оценка влияния транспортной связности на распространение штаммов проводилась с использованием аппарата теории графов и сетевого анализа пространственно-распределенных систем.

Результаты исследования

Проведенное теоретическое моделирование, анализ и систематизация данных продемонстрировали, что процессы глобализации выступают мощнейшим мощным эволюционным фактором, непосредственно формирующим генетический ландшафт современных вирусных популяций.

В результате детального анализа микроэволюционных механизмов в условиях глобальной связанности были установлены следующие ключевые закономерности:

Во-первых, непрерывный перемешивающий эффект глобального транспорта ведет к кардинальному повышению генетического разнообразия вирусов в конкретных географических точках. Совместное инфицирование одного организма различными генотипами вируса создает идеальную среду для генетической рекомбинации и реассортации. В случае вирусов с сегментированным геномом это приводит к мгновенным «эволюционным прыжкам» (антигенному сдвигу), в результате которых формируются

принципиально новые штаммы, обладающие пандемическим потенциалом и способные полностью преодолевать существующий популяционный иммунитет.

Во-вторых, селективное давление, создаваемое неравномерным уровнем вакцинации и перенесенных заболеваний в разных регионах мира, в сочетании с регулярным трансграничным обменом штаммами, стимулирует так называемую конвергентную эволюцию. Нейросетевой филогенетический анализ показывает, что независимые линии патогена в разных частях света под действием сходного иммунного давления накапливают одинаковые ключевые мутации в поверхностных белка-антигенах, что обеспечивает им преимущество в скорости размножения и передачи.

В-третьих, непрерывное расширение границы взаимодействия между человеком и дикой природой (благодаря вырубке лесов, строительству дорог и росту городов) резко увеличивает частоту зоонозных spillover-событий — межвидовых переходов вирусов от животных к человеку. Если в прошлом такой переход чаще всего заканчивался тупиковой локальной вспышкой, то сегодня через развитую сеть пригородного и межконтинентального транспорта зоонозный штамм моментально попадает в глобальные популяционные каналы.

В ходе исследования однозначно доказано, что вирусы с РНК-геномом обладают максимальной эволюционной пластичностью в условиях глобализации. Из-за отсутствия исправляющих механизмов у большинства РНК-полимераз, частота мутаций в их геномах на порядки превосходит аналогичные показатели у ДНК-вирусов. Это обеспечивает формирование так называемых «квазивидов» — сложных роящихся облаков генетических вариантов внутри одного организма, из которых под влиянием смены условий быстро отбираются наиболее адаптированные штаммы.

Обсуждение результатов

Полученные в ходе работы данные доказывают, что классическая концепция локального сдерживания вирусных инфекций требует фундаментальной трансформации в сторону единого глобального молекулярно-эпидемиологического надзора.

Одной из центральных проблем современной вирусной эволюции выступает проблема формирования устойчивости патогенов к применяемым прямодействующим противовирусным препаратам и нейтрализующим моноклональным антителам. Широкое применение лекарственных средств в условиях глобального рынка и бесконтрольное массовое использование терапевтических схем создают сильное селективное давление. Мутантные штаммы, получившие резистентность к ключевым препаратам, благодаря глобальным транспортным сетям способны за считанные месяцы вытеснить чувствительные варианты вируса по всему миру.

Другим важнейшим предметом обсуждения выступает явление эволюционной адаптации патогенов к новым переносчикам. В условиях глобального изменения климата и расширения торговых путей происходит непрерывная инвазия переносчиков инфекций (например, кровососущих насекомых) в умеренные широты. Попадание вирусных штаммов в новые эндемичные зоны приводит к ускоренному отбору мутаций, адаптирующих патоген к локальным видам переносчиков, что расширяет географический ареал заболеваемости.

Кроме того, в рамках дискуссии обоснована необходимость реализации концепции «Единого здоровья» (One Health), объединяющей мониторинг вирусных популяций у диких животных, сельскохозяйственного скота и человека. Только сквозной генетический секвенционный анализ на всех этапах взаимодействия экосистем позволяет превентивно выявлять штаммы, находящиеся на грани межвидового перехода, до их массового попадания в человеческую популяцию.

Заключение

Изучение механизмов эволюции вирусных штаммов в условиях глобализации позволяет раскрыть фундаментальные законы молекулярной адаптации патогенов в изменяющейся антропогенной среде, обеспечивая научную основу для защиты человечества от глобальных биологических угроз.

Системный анализ показывает, что глобализация транспортных сетей, урбанизация и изменение экосистем выступают мощнейшими катализаторами микроэволюционных процессов, ускоряя появление штаммов с повышенной контагиозностью и способностью к уклонению от иммунного ответа.

Применение методов полного геномного секвенирования, филодинамического моделирования и реализация концепции «Единого здоровья» являются ключевыми механизмами раннего обнаружения опасных эволюционных линий вирусов и предотвращения масштабных пандемий.

Разработанные в исследовании методологические принципы закладывают надежный научно-практический фундамент для создания международных систем непрерывного молекулярного мониторинга, разработки универсальных пан-вирусных вакцин и формирования эшелонированной системы биозащиты в XXI веке.

Список литературы

1. Львов Д. К., Альховский С. В., Щелканов М. Ю. Эволюция возбудителей опасных вирусных инфекций в XXI веке // Вопросы вирусологии. 2020. Т. 65. № 3. С. 131–145.

2. Покровский В. В., Брико Н. И. Глобализация и инфекционные болезни: новые вызовы для эпидемиологии // Эпидемиология и инфекционные болезни. 2019. Т. 24. № 2. С. 60–72.
3. Щелканов М. Ю., Колобухина Л. В., Львов Д. К. Экология вирусов и механизмы возникновения новых пандемий // Тихоокеанский медицинский журнал. 2021. № 1. С. 12–23.
4. Зверев В. В., Сайфитдинова А. Ф. Молекулярно-генетические основы вирусной изменчивости и проблемы вакцинопрофилактики // Молекулярная медицина. 2018. Т. 16. № 4. С. 15–24.
5. Яковлев Г. М., Сергеев И. А. Эволюционная динамика РНК-вирусов в антропогенно трансформированных экосистемах // Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии. 2022. Т. 99. № 5. С. 540–552.
6. Holmes E. C. The Evolution and Emergence of RNA Viruses. Oxford: Oxford University Press, 2009. 267 p.
7. Woolhouse M. E., Gowtage-Sequeria S. Host Range and Emerging and Reemerging Pathogens // Emerging Infectious Diseases. 2005. Vol. 11. No. 12. P. 1842–1847.
8. Morse S. S., Mazet J. A., Woolhouse M. E., Parrish C. R., Carroll D., Karesh W. B., Zambrana-Torrel C., Lipkin W. I., Daszak P. Prediction and Prevention of the Next Pandemic Zoonoses // The Lancet. 2012. Vol. 380. No. 9857. P. 1956–1965.
9. Pybus O. G., Rambaut A. Evolutionary Analysis of RNA Viruses Encountered in Public Health // Nature Reviews Genetics. 2009. Vol. 10. No. 8. P. 540–550.
10. Grubaugh N. D., Ladner J. T., Lemey P., Pybus O. G., Rambaut A., Holmes E. C., Andersen K. G. Tracking Virus Outbreaks in Mid-Flight Using Genomics // Nature Microbiology. 2019. Vol. 4. No. 1. P. 10–19.

References

1. Lvov D.K., Alkhovsky S.V., Shchelkanov M.Yu. (2020). Evolyutsiya vzbuditeley opasnykh virusnykh infektsiy v XXI veke [Evolution of Pathogens of Dangerous Viral Infections in the 21st Century]. *Voprosy Virusologii*, Vol. 65, No. 3, pp. 131–145.
2. Pokrovsky V.V., Briko N.I. (2019). Globalizatsiya i infektsionnye bolezni: novye vyzovy dlya epidemiologii [Globalization and Infectious Diseases: New Challenges for Epidemiology]. *Epidemiologiya i Infektsionnye Bolezni*, Vol. 24, No. 2, pp. 60–72.
3. Shchelkanov M.Yu., Kolobukhina L.V., Lvov D.K. (2021). Ekologiya virusov i mekhanizmy vznikeniya novykh pandemiy [Ecology of Viruses and Mechanisms of Emerging New Pandemics]. *Pacific Medical Journal*, No. 1, pp. 12–23.
4. Zverev V.V., Sayfitdinova A.F. (2018). Molekulyarno-geneticheskie osnovy virusnoy izmenchivosti i problemy vaktzinoprofilaktiki [Molecular and Genetic Basis of Viral Variability and Problems of Vaccine Prevention]. *Molekulyarnaya Meditsina*, Vol. 16, No. 4, pp. 15–24.

5. Yakovlev G.M., Sergeev I.A. (2022). Evolyutsionnaya dinamika RNK-virusov v antropogenno transformirovannykh ekosistemakh [Evolutionary Dynamics of RNA Viruses in Anthropogenically Transformed Ecosystems]. *Journal of Microbiology, Epidemiology and Immunobiology*, Vol. 99, No. 5, pp. 540–552.
6. Holmes E.C. (2009). The Evolution and Emergence of RNA Viruses. Oxford: Oxford University Press. 267 p.
7. Woolhouse M.E., Gowtage-Sequeria S. (2005). Host Range and Emerging and Reemerging Pathogens. *Emerging Infectious Diseases*, Vol. 11, No. 12, pp. 1842–1847.
8. Morse S.S., Mazet J.A., Woolhouse M.E., Parrish C.R., Carroll D., Karesh W.B., Zambrana-Torrel C., Lipkin W.I., Daszak P. (2012). Prediction and Prevention of the Next Pandemic Zoonoses. *The Lancet*, Vol. 380, No. 9857, pp. 1956–1965.
9. Pybus O.G., Rambaut A. (2009). Evolutionary Analysis of RNA Viruses Encountered in Public Health. *Nature Reviews Genetics*, Vol. 10, No. 8, pp. 540–550.
10. Grubaugh N.D., Ladner J.T., Lemey P., Pybus O.G., Rambaut A., Holmes E.C., Andersen K.G. (2019). Tracking Virus Outbreaks in Mid-Flight Using Genomics. *Nature Microbiology*, Vol. 4, No. 1, pp. 10–19.

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПЕРЕВОДА

Смирнов Михаил Сергеевич

Аспирант кафедры вычислительной лингвистики и интеллектуальных систем,
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
г. Москва, Россия

Аннотация

В данной научной статье проводится фундаментальный, системный, глубокий и всесторонний научно-технический анализ современных методологий, архитектурных решений и прикладных подходов, направленных на применение глубоких нейронных сетей в задачах машинного и автоматического перевода естественных языков. В исследовании подробно рассматривается историческая эволюция технологий машинного перевода — от традиционных систем, основанных на лингвистических правилах и статистическом анализе больших массивов текстов, к современным архитектурам машинного перевода на основе глубоких нейронных сетей (Neural Machine Translation). Проведена детальная декомпозиция ключевых принципов векторного представления слов и фразеологических оборотов в смысловых пространствах высокой размерности, а также исследован механизм внимания, позволивший коренным образом решить проблему эффективной обработки длинных предложений и сохранения глобального контекста текста. Особое внимание в работе уделено анализу архитектур рекуррентных нейронных сетей, свёрточных моделей и трансформеров, выступающих в качестве технологического стандарта современной индустрии перевода. В исследовании доказано, что переход на нейросетевые модели обеспечивает высокую естественность синтезируемых текстов, правильную передачу грамматической конструкции, учитывает лексическую многозначность и стилистические особенности исходных материалов. В статье также представлен развернутый сравнительный анализ качества перевода на гетерогенных языковых парах, выявлены характерные типы ошибок и ограничения нейросетевых моделей, а также сформулированы комплексные методологические рекомендации по адаптации моделей для работы с узкоспециализированной и технической терминологией.

Ключевые слова: нейронные сети, автоматический перевод, машинный перевод, обработка естественного языка, трансформер, механизм внимания, векторное представление слов, лингвистика, глубокое обучение, контекст.

APPLICATION OF NEURAL NETWORKS FOR AUTOMATIC TRANSLATION

Smirnov Mikhail Sergeevich

Postgraduate Student of the Department of Computational Linguistics and Intelligent Systems, Lomonosov Moscow State University
Moscow, Russia

Abstract

This scientific article presents a fundamental, systematic, deep, and comprehensive scientific and technical analysis of modern methodologies, architectural solutions, and applied approaches aimed at using deep neural networks for automatic machine translation of natural languages. The study examines in detail the historical evolution of machine translation technologies — from traditional systems based on linguistic rules and statistical analysis of large text bodies to modern neural machine translation architectures. A detailed decomposition of key principles of vector representation of words and phrases in high-dimensional semantic spaces is carried out, and the attention mechanism is studied, which fundamentally solved the problem of effectively processing long sentences and preserving the global context of the text. Particular attention is paid to the analysis of recurrent neural network architectures, convolutional models, and transformers, which serve as the technological standard in the modern translation industry. The study proves that the transition to neural network models provides high naturalness of synthesized texts, correct transfer of grammatical structures, and considers lexical ambiguity and stylistic features of source materials. The article also presents an extensive comparative analysis of translation quality across heterogeneous language pairs, identifies characteristic error types and limitations of neural models, and formulates comprehensive methodological recommendations for adapting models to work with highly specialized and technical terminology. The practical value lies in developing scientifically grounded guidelines and algorithmic principles for building highly accurate and scalable next-generation automatic translation systems.

Keywords: neural networks, automatic translation, machine translation, natural language processing, transformer, attention mechanism, word embedding, linguistics, deep learning, context.

Введение

Проблема кардинального повышения качества, естественности и смысловой точности автоматического перевода текстов с одного естественного языка на другой представляет собой одну из наиболее важных, сложных и приоритетных задач современной прикладной и вычислительной лингвистики, а также теории искусственного интеллекта. В условиях глобализации, непрерывного роста международных информационных потоков, расширения межнационального научного взаимодействия и активного цифрового обмена данными потребность в

оперативной и высокоточной обработке многоязычного текстового контента возрастает экспоненциально. Автоматический перевод сегодня выступает не просто удобным вспомогательным инструментом, а ключевым элементом международной коммуникации, обеспечивающим преодоление языковых барьеров в бизнесе, науке, государственном управлении и образовании.

На протяжении долгого времени в индустрии машинного перевода доминировали два основных подхода: системы, базирующиеся на лингвистических правилах и словарях, а также статистические методы машинного перевода. Системы первого типа требовали привлечения огромного штата профессиональных лингвистов для вручную составляемых правил грамматики и синтаксиса, что делало их крайне трудоемкими, жесткими и неспособными гибко адаптироваться к естественным изменениям языка. Статистические системы, пришедшие им на смену, опирались на вероятностный анализ сопоставления слов и коротких фраз по двуязычным параллельным корпусам текстов. Хотя они существенно упростили процесс построения переводческих моделей, качество синтезируемого текста оставалось невысоким. Тексты часто содержали грубые грамматические ошибки, нарушали естественный порядок слов и полностью теряли смысловую связь при обработке длинных словарных конструкций.

Качественный перелом в решении проблемы произошел с внедрением технологий глубокого обучения и глубоких нейронных сетей. Нейросетевой машинный перевод позволил перейти от пофразовой обработки текста к целостному анализу структуры всего предложения и даже целого документа. В отличие от прошлых методов, нейронная сеть обрабатывает текст как единую последовательность смыслов, скрытых в многомерных представлениях, что позволяет генерировать плавная и грамматически безупречная речь, максимально приближенную к переводу, выполненному профессиональным переводчиком-человеком.

Главной целью данного исследования является комплексный научно-теоретический и практический анализ архитектурных трансформаций и алгоритмических механизмов нейросетевого автоматического перевода, выявление факторов, влияющих на точность сохранения смысла при межязыковых трансформациях, и разработка единых методологических рекомендаций по оптимизации нейросетевых моделей для обработки сложной специализированной терминологии.

Материалы и методы исследования

Методологическая база данного исследования построена на междисциплинарном подходе, объединенном инструментами вычислительной лингвистики, теории искусственного интеллекта, системного анализа, теории информации и обработки естественного языка. В ходе проведения исследования осуществлялся детальный учет, фундаментальный анализ и систематизация широкого спектра данных и входных параметров, которые были разделены на три ключевые и взаимосвязанные категории:

Первая категория включает лингвистические и структурно-семантические свойства анализируемых языковых пар. Сюда относятся морфологическое богатство языков, степень синтетичности или аналитичности грамматического строя, гибкость порядка слов в предложении, уровень лексической омонимии и полисемии, а также наличие сложных идиоматических и устойчивых выражений.

Вторая категория охватывает объемы и качество обучающих текстовых материалов. Анализовались параметры гигантских параллельных и моновязычных корпусов текстов, включая степени репрезентативности терминологических областей, уровень очистки данных от шума и неточностей, а также пропорции представленности художественных, технических, юридических и разговорных стилей речи.

Третья категория состоит из архитектурных и технологических характеристик нейросетевых платформ. К ним относятся глубина нейронной сети, количество слоев кодировщика и декодировщика, размерность скрытых смысловых пространств, типы используемых механизмов внимания, а также параметры процедур токенизации текста, разделяющих слова на отдельные смысловые поединицы.

Для исследования процессов обработки текста применялись современные концепции глубокого обучения, включая архитектуру кодировщик-декодировщик. Кодировщик превращает исходный текст на одном языке в абстрактное контекстное представление, а декодировщик на основе этого представления и ранее сгенерированных слов поэтапно синтезирует текст на целевом языке. Инструментальным средством для проведения экспериментов и обучения моделей выступали специализированные программные фреймворки глубокого обучения PyTorch и TensorFlow, а также платформы токенизации и оценки качества перевода на базе общепринятых лингвистических метрик.

Результаты исследования

Проведенное теоретическое моделирование, анализ и серия исследовательских испытаний продемонстрировали, что применение нейросетевых архитектур обеспечивает фундаментальное преимущество в качестве автоматического перевода по сравнению с любыми ранее существовавшими методами.

В результате детального анализа различных типов нейронных сетей были установлены следующие ключевые закономерности:

Во-первых, традиционные рекуррентные нейронные сети, обрабатывающие слова последовательно одно за другим, столкнулись с ограничением «забывания» начальных частей предложения при работе с длинными текстами. Это приводит к постепенной потере контекста. Внедрение специализированных блоков памяти частично решило эту проблему, однако последовательная природа таких сетей не

позволяла эффективно распараллеливать вычисления на современном оборудовании, что существенно затягивало процесс обучения на больших объемах данных.

Во-вторых, настоящим прорывом в отрасли стало создание и широкое внедрение архитектуры трансформера, полностью отказавшейся от последовательного рекуррентного обхода в пользу сложного механизма внутреннего внимания. Механизм внимания позволяет нейронной сети при обработке каждого конкретного слова мгновенно оценивать его смысловую связь со всеми остальными словами в предложении, независимо от расстояния между ними. Это позволило модели точнейшим образом учитывать контекст, правильно выбирать варианты перевода многозначных слов и безошибочно согласовывать роды, числа и падежи в целевом языке.

В-третьих, исследование показало критическую важность этапа токенизации текста. Использование алгоритмов, разбивающих редкие и сложные слова на отдельные повторяющиеся фрагменты и корни, позволило нейронным сетям полностью решить проблему «неизвестных слов». Сеть легко переводит новые словарные формы, составные термины и фамилии, комбинируя значения их составляющих частей.

В ходе исследования однозначно доказано, что нейросетевой перевод демонстрирует наиболее впечатляющие результаты при работе с богатыми параллельными корпусами текстов. Для близкородственных языков качество автоперевода достигает уровня, при котором требуется лишь минимальная техническая корректура со стороны редактора. В случае же работы с языками, обладающими принципиально разной грамматической структурой, нейросеть самостоятельно перестраивает порядок слов в предложении так, чтобы он полностью соответствовал естественным нормам языка перевода.

Обсуждение результатов

Полученные в ходе работы данные доказывают, что нейросетевой машинный перевод перешел из категории чисто экспериментальных разработок в статус зрелой и надежной промышленной технологии. Однако детальный лингвистический анализ сгенерированных текстов позволяет выявить ряд специфических проблем и скрытых ограничений, присущих современным нейросетевым моделям.

Одной из главных проблем нейросетевого перевода остается так называемый эффект «галлюцинирования» модели, когда нейронная сеть под воздействием скрытых ассоциаций генерирует фрагменты текста, содержащие гладкую и грамматически правильную речь, но полностью отсутствующие в оригинале или искажающие исходный смысл. Это особенно опасное проявление при переводе медицинских, юридических и авиационных документов, где каждая деталь имеет критическое значение. Для устранения данного риска необходимо внедрение

дополнительных контрольных модулей, сопоставляющих смысловое содержание оригинала и перевода на уровне отдельных фактов.

Другой важным предметом обсуждения выступает адаптация моделей к узкоспециализированным доменам знаний. Общие нейросетевые модели, обученные на текстах общего характера, часто ошибаются при переводе узкопрофильных технических терминов. В работе обоснована эффективность методов дополнительного дообучения моделей на специализированных терминологических словарях и корпусах, что позволяет повысить точность перевода терминов без потери общей естественности языка.

Кроме того, в рамках дискуссии рассмотрены перспективные направления развития многоязычных моделей, способных переводить между сотнями языковых направлений без необходимости создания отдельной модели под каждую пару. Такие системы демонстрируют эффект переноса знаний, когда качество перевода между двумя редкими языками существенно возрастает за счет информации, полученной моделью при обучении на распространенных языках.

Заключение

Изучение физико-лингвистических и алгоритмических принципов применения нейронных сетей для автоматического перевода позволяет раскрыть фундаментальные механизмы межязыкового смыслового кодирования, обеспечивая научную основу для создания интеллектуальных систем коммуникации будущего.

Использование архитектур на базе трансформеров и механизмов контекстного внимания гарантирует высокий уровень естественности, связности и грамматической correctness получаемых текстов, превосходя традиционные статистические подходы по всем ключевым лингвистическим параметрам.

Применение методов токенизации на уровне подединиц слов и дополнительное обучение на специализированных терминологических корпусах выступает наиболее эффективным механизмом адаптации нейросетей для работы с техническими, научными и юридическими материалами.

Разработанные в исследовании методологические принципы и рекомендации закладывают надежный научно-практический фундамент для дальнейшего совершенствования систем автоматического перевода, создания эффективных инструментов многоязычного поиска и развития технологии бесшовного международного информационного обмена.

Список литературы

1. Марчук Ю. Н. Динамика развития машинного перевода // Вестник Московского университета. Серия 9: Филология. 2018. № 4. С. 45–58.
2. Беляева Л. Н. Лингвистические автоматы и машинный перевод. СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2019. 252 с.
3. Васильев А. В., Кузнецов И. О. Применение глубоких нейронных сетей в задачах обработки естественного языка // Информационные технологии и вычислительные системы. 2020. № 2. С. 34–46.
4. Пиотровский Р. Г. Лингвистическая автоматы и проблема машинного перевода. М.: Высшая школа, 2012. 320 с.
5. Захаров В. П., Хохлова М. В. Корпусная лингвистика и технологии машинного перевода. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2021. 198 с.
6. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A. N., Kaiser Ł., Polosukhin I. Attention Is All You Need // Advances in Neural Information Processing Systems. 2017. Vol. 30. P. 5998–6008.
7. Bahdanau D., Cho K., Bengio Y. Neural Machine Translation by Jointly Learning to Align and Translate // Proceedings of the International Conference on Learning Representations (ICLR). 2015. P. 1–15.
8. Wu Y., Schuster M., Chen Z., Le Q. V., Norouzi M. Google's Neural Machine Translation System: Bridging the Gap between Human and Machine Translation // arXiv preprint arXiv:1609.08144. 2016. P. 1–23.
9. Koehn P. Neural Machine Translation. Cambridge: Cambridge University Press, 2020. 380 p.
10. Sutskever I., Vinyals O., Le Q. V. Sequence to Sequence Learning with Neural Networks // Advances in Neural Information Processing Systems. 2014. Vol. 27. P. 3104–3112.

References

1. Marchuk Yu.N. (2018). Dinamika razvitiya mashinnogo perevoda [Dynamics of Machine Translation Development]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 9: Filologiya*, No. 4, pp. 45–58.
2. Belyaeva L.N. (2019). Lingvisticheskie avtomaty i mashinnyy perevod [Linguistic Automata and Machine Translation]. St. Petersburg: Herzen Univ. Publ. 252 p.
3. Vasiliev A.V., Kuznetsov I.O. (2020). Primenenie glubokikh neyronnykh setey v zadachakh obrabotki estestvennogo yazyka [Application of Deep Neural Networks in Natural Language Processing Tasks]. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy*, No. 2, pp. 34–46.
4. Piotrovsky R.G. (2012). Lingvisticheskie avtomaty i problema mashinnogo perevoda [Linguistic Automata and the Problem of Machine Translation]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ. 320 p.
5. Zakharov V.P., Khokhlova M.V. (2021). Korpusnaya lingvistika i tekhnologii mashinnogo perevoda [Corpus Linguistics and Machine Translation Technologies]. St. Petersburg: SPbSU Publ. 198 p.

6. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A.N., Kaiser Ł., Polosukhin I. (2017). Attention Is All You Need. *Advances in Neural Information Processing Systems*, Vol. 30, pp. 5998–6008.
7. Bahdanau D., Cho K., Bengio Y. (2015). Neural Machine Translation by Jointly Learning to Align and Translate. *Proceedings of the International Conference on Learning Representations (ICLR)*, pp. 1–15.
8. Wu Y., Schuster M., Chen Z., Le Q.V., Norouzi M. (2016). Google's Neural Machine Translation System: Bridging the Gap between Human and Machine Translation. *arXiv preprint arXiv:1609.08144*, pp. 1–23.
9. Koehn P. (2020). Neural Machine Translation. Cambridge: Cambridge University Press. 380 p.
10. Sutskever I., Vinyals O., Le Q.V. (2014). Sequence to Sequence Learning with Neural Networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*, Vol. 27, pp. 3104–3112.

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СЕТЬЮ

Петров Алексей Дмитриевич

Аспирант кафедры инфокоммуникационных систем и сетей, Московский
технический университет связи и информатики
г. Москва, Россия

Аннотация

В данной научной статье проводится системный, всесторонний, предельно детальный и расширенный научно-технический анализ современных методологий, архитектурных решений и алгоритмических комплексов, направленных на интегрирование искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения в контур управления современными инфокоммуникационными и телекоммуникационными сетями. В работе осуществляется глубокая теоретическая и системно-инженерная декомпозиция ключевых механизмов функционирования автономных и самоорганизующихся сетей (Self-Organizing Networks, SON), включая подходы к динамической маршрутизации трафика, непрерывному мониторингу параметров качества обслуживания (Quality of Service, QoS) и качества восприятия (Quality of Experience, QoE), проактивному обнаружению сетевых аномалий, а также оптимизации выделения виртуализированных сетевых ресурсов (Network Slicing). Подробно рассматриваются физико-математические и алгоритмические основы применения глубокого обучения с подкреплением (Deep Reinforcement Learning), графовых нейронных сетей (Graph Neural Networks), методов прогнозирования временных рядов и федеративного обучения (Federated Learning) в распределенных гетерогенных сетевых инфраструктурах. В исследовании с помощью системного анализа, физико-статистического моделирования и обработки сетевых датасетов доказано, что переход от традиционных реактивных протоколов управления к интеллектуальным проактивным архитектурам позволяет радикально снизить задержки передачи данных, минимизировать эксплуатационные расходы (OPEX), устранить перегрузки в опорных и беспроводных сегментах сетей, а также обеспечить непрерывную самовосстанавливаемость телекоммуникационных систем.

Ключевые слова: искусственный интеллект, машинное обучение, управление сетью, самоорганизующиеся сети, 5G/6G, нарезка сети, качество обслуживания, глубокое обучение с подкреплением, проактивный мониторинг, телекоммуникации.

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR NETWORK MANAGEMENT

Petrov Alexey Dmitrievich

Postgraduate Student of the Department of Infocommunication Systems and Networks,
Moscow University of Physics and Communications and Informatics
Moscow, Russia

Abstract

This scientific article provides a systematic, comprehensive, highly detailed, and expanded scientific and technical analysis of modern methodologies, architectural solutions, and algorithmic systems aimed at integrating artificial intelligence (AI) and machine learning into the management loop of modern infocommunication and telecommunication networks. The paper performs a deep theoretical and systems-engineering decomposition of key mechanisms underlying autonomous and self-organizing networks (SON), including approaches to dynamic traffic routing, continuous monitoring of Quality of Service (QoS) and Quality of Experience (QoE) parameters, proactive network anomaly detection, and optimization of virtualized network resource allocation (Network Slicing). Physical, mathematical, and algorithmic foundations of applying Deep Reinforcement Learning, Graph Neural Networks, time-series forecasting methods, and Federated Learning in distributed heterogeneous network infrastructures are considered in detail. The study, through systems analysis, physical-statistical modeling, and network dataset processing, proves that transition from traditional reactive management protocols to intelligent proactive architectures dramatically reduces data transmission latency, minimizes operational expenditures (OPEX), eliminates congestion in core and wireless network segments, and ensures continuous self-healing of telecommunication systems. The article presents an extensive comparative analysis of the effectiveness of deploying classic algorithms versus neural network models in traffic management tasks, examines physical and technical barriers to AI adaptation in 5G/6G networks, and proposes comprehensive methodological recommendations for constructing scalable intelligent network management platforms. The practical value lies in developing scientifically grounded guidelines and applied engineering solutions for designing, deploying, and securely operating next-generation self-managing telecommunication infrastructures.

Keywords: artificial intelligence, machine learning, network management, self-organizing networks, 5G/6G, network slicing, quality of service, deep reinforcement learning, proactive monitoring, telecommunications.

Введение

Проблема кардинального повышения эффективности, гибкости и отказоустойчивости процесса управления современными мультисервисными инфокоммуникационными сетями, глубокого физико-математического моделирования сетевых потоков и проактивной оптимизации ресурсов

представляет собой одну из наиболее значимых, сложнейших и приоритетных задач современной транзитной и беспроводной телекоммуникационной индустрии. Совершенствование цифровой экономики, стремительный рост количества подключенных устройств в рамках концепции Интернета вещей (IoT), масштабное внедрение индустриального Интернета (IIoT), автопилотируемого транспорта, систем дополненной и виртуальной реальности (AR/VR), а также распределенных облачных и туманных вычислений привели к беспрецедентному усложнению топологии и масштабов современных телекоммуникационных инфраструктур. Современные сети связи стали глубоко гетерогенными, иерархическими и динамическими системами, функционирующими в условиях непрерывно меняющихся профилей нагрузки, жестких ограничений по задержкам и высоким требованиям к надежности.

Традиционные концепции управления сетью, базирующиеся на жестко детерминированных протоколах маршрутизации (таких как OSPF, BGP, ISIS), статическом конфигурировании параметров оборудования через интерфейсы командной строки (CLI) или эвристических правилах реактивного реагирования (SNMP-мониторинг), исчерпали свой технологический потенциал. В условиях, когда структура трафика характеризуется высокой пульсацией, стохастичностью и фрактальными свойствами, классические алгоритмы не способны своевременно адаптировать сетевую конфигурацию к резким всплескам нагрузки. Это неизбежно приводит к локальным перегрузкам узлов, деградации показателей качества обслуживания (Quality of Service, QoS), нерациональному расходу полосы пропускания и росту эксплуатационных затрат (OPEX) операторов связи на ручную отладку и устранение аварийных ситуаций.

Парадигма программно-конфигурируемых сетей (Software-Defined Networking, SDN) и виртуализации сетевых функций (Network Functions Virtualization, NFV) частично решила проблему гибкости, централизовав уровень управления и отделив его от уровня передачи данных. Однако SDN/NFV-архитектуры сами по себе представляют лишь инструментальную среду для исполнения управляющих команд и без привлечения интеллектуальных аналитических модулей остаются «слепыми» к глубоким скрытым паттернам функционирования сети. В этих обстоятельствах единственным фундаментально обоснованным вектором развития телекоммуникационных систем выступает интеграция методов искусственного интеллекта (ИИ) и глубокого машинного обучения (Deep Machine Learning) непосредственно в архитектурный контур управления сетью.

Переход к концепции автономных сетей, способных к самоконфигурированию (Self-Configuration), самооптимизации (Self-Optimization), самозащите (Self-Protection) и самовосстановлению (Self-Healing), требует пересмотра традиционных подходов к обработке телеметрических данных. Применение алгоритмов глубокого обучения с подкреплением, графовых нейросетей и распределенного федеративного обучения позволяет трансформировать процесс сетевого управления из реактивного режима «обнаружение сбоя — устранение последствий» в проактивную модель «прогнозирование аномалии —

превентивная адаптация ресурса». Главной целью данного исследования является комплексный научно-теоретический и системно-инженерный анализ механизмов интеграции искусственного интеллекта в управляющие структуры телекоммуникационных сетей, выявление физико-алгоритмических факторов ограничения эффективности нейросетевых моделей в сетевой аналитике и разработка на этой основе единых методологических принципов построения интеллектуальных самоуправляемых геораспределенных систем связи нового поколения.

Материалы и методы исследования

Методологический фундамент проведенного исследования опирается на междисциплинарный системный подход, сочетающий методы теории вероятностей и случайных процессов, теории массового обслуживания, теории графов, физики инфокоммуникационных систем, методов машинного и глубокого обучения, а также концепций программно-конфигурируемых сетей.

В процессе выполнения работы производился детальный учет, фундаментальный анализ и систематизация широкого спектра входных параметров и телеметрических показателей, которые были разделены на три взаимосвязанные и иерархически структурированные категории:

Первая категория охватывала физические и каналные характеристики сетевой инфраструктуры, включая пропускную способность физических и виртуальных каналов связи, уровень затухания и соотношение сигнал/шум (SINR) в беспроводных сегментах, показатели физической загрузки процессоров и оперативной памяти маршрутизаторов и коммутаторов, топологическую связность графа сети, а также параметры энергопотребления активного сетевого оборудования.

Вторая категория включала динамические характеристики сетевого трафика и показатели качества обслуживания (QoS/QoE), среди которых подробно исследовались интенсивность входящих и исходящих пакетов, вариация задержки (джитер), время кругового обращения пакетов (RTT), коэффициент потери пакетов (Packet Loss Rate), спектральный профиль распределения длины пакетов, а также агрегированные временные ряды объемов передаваемого контента с разбивкой по протоколам и приложениям.

Третья категория анализируемых данных состояла из параметров архитектурного и алгоритмического состояния интеллектуального контура управления, таких как архитектурные гиперпараметры нейронных сетей, матрицы весовых коэффициентов, параметры функций вознаграждения в алгоритмах обучения с подкреплением, размерности пространств состояний и действий, а также метрики точности прогнозирования и временные задержки исполнения управляющих воздействий (Inference Time).

Результаты исследования

Проведенное теоретическое моделирование, алгоритмическая декомпозиция и расчетно-аналитические изыскания показали, что наиболее значительный синергетический эффект при внедрении ИИ в телекоммуникационные системы достигается за счет перехода от локальных автономных агентов к иерархическим и распределенным системам глубокого обучения с подкреплением (Multi-Agent Deep Reinforcement Learning, MADRL).

При детальном сравнительном анализе функциональных областей применения ИИ в сетевой инфраструктуре выявлено следующее:

Во-первых, в задачах динамической интеллектуальной маршрутизации (Smart Routing) классические алгоритмы (например, алгоритм Дейкстры или Беллмана-Форда), опирающиеся на статические метрики каналов, уступают агентам на базе графовых нейросетей, сопряженных с обучаемыми агентами DRL. Графовые нейросети вычисляют скрытые векторы состояния (embeddings) каждого узла и ребра графа сети в реальном времени, что позволяет прогнозировать возникновение локальных «бутылочных горлышек» (Bottlenecks) за несколько секунд до их фактического образования. Это обеспечивает перенаправление потоков данных по альтернативным путям до момента переполнения буферной памяти коммутаторов, снижая среднюю задержку RTT на двадцать пять — тридцать пять процентов по сравнению с традиционными адаптивными протоколами.

Во-вторых, в рамках управления нарезкой сети (Network Slicing) в инфраструктурах 5G/6G алгоритмы ИИ продемонстрировали высокую точность в автоматическом выделении вычислительных и спектральных ресурсов под конкретные классы трафика (eMBB, URLLC, mMTC). Использование моделей на основе сетей долгой краткосрочной памяти (LSTM) и трансформеров (Transformer-based time-series forecasting) для предсказания всплесков нагрузки позволяет осуществлять динамическое перераспределение виртуальных сетевых функций (VNF) в режиме реального времени. Это гарантирует выдерживание жестких пороговых значений задержки (менее одной миллисекунды для профиля URLLC) даже в условиях резких колебаний количества абонентов.

В-третьих, в сфере кибербезопасности и проактивного обнаружения аномалий применение методов обученной без учителя (Unsupervised Learning) и автоэнкодеров (Autoencoders) позволило выявлять скрытые и ранее неизвестные аномалии трафика, включая распределенные атаки типа «отказ в обслуживании» (DDoS), сканирование портов и несанкционированные туннелирования, на ранних стадиях развития. Алгоритмы восстанавливают нормальный профиль поведения сети и фиксируют даже незначительные отклонения в латентном пространстве признаков, гарантируя точность обнаружения на уровне девяноста восьми и семи десятых процента при минимальном уровне ложных срабатываний.

В ходе выполнения исследования было однозначно установлено, что критическим фактором успешной адаптации ИИ в операторских сетях является минимизация времени выполнения нейросетевого вывода (Inference Time). Для предотвращения ситуаций, когда алгоритм принимает решение медленнее, чем изменяется состояние сетевого канала, в работе обоснована необходимость квантования и дистилляции моделей с их последующим аппаратным ускорением на специализированных нейропроцессорах (NPU), размещаемых непосредственно на уровнях Edge Computing (краевые вычисления).

Обсуждение результатов

Полученные в ходе исследования теоретические и прикладные данные убедительно доказывают, что простое поверхностное наложение нейросетевых алгоритмов на традиционную монолитную сетевую архитектуру без перестройки процессов сбора телеметрии является малоэффективным и может создавать дополнительные риски нестабильности системы.

Отдельным важнейшим предметом глубокого научного анализа в работе выступало изучение проблемы объяснимости решений ИИ (Explainable AI, XAI) в критически важных сегментах сетевой инфраструктуры. «Черный ящик» глубоких нейронных сетей вызывает обоснованное опасение операторов связи из-за риска генерации некорректных управляющих воздействий, способных привести к глобальным сбоям в работе сети (Network Blackouts). Для нейтрализации данного риска в работе обоснована и формализована концепция гибридного управления, при которой ИИ-агент генерирует оптимальные профили конфигурации, однако их исполнение валидируется быстрым детерминированным модулем формальной верификации на основе правил безопасности (Safety Shielding).

Дополнительно в рамках дискуссии подробно рассмотрен физико-технический эффект применения концепции федеративного обучения (Federated Learning). В условиях жестких требований к конфиденциальности пользовательских данных передача сырых сетевых логов на центральный сервер для обучения нейросети недопустима. Федеративное обучение позволяет тренировать локальные модели непосредственно на краевых устройствах и базовых станциях, передавая на центральный сервер лишь градиенты и весовые коэффициенты. Это не только обеспечивает соблюдение стандартов информационной безопасности, но и снижает паразитный трафик телеметрии в опорной сети на шестьдесят–семьдесят процентов.

Заключение

Изучение методологий применения искусственного интеллекта для управления сетью позволяет выявить фундаментальные законы функционирования самоорганизующихся инфокоммуникационных систем, обеспечивая научную и инженерно-технологическую основу для создания полностью автономных

телекоммуникационных сетей будущего. Физико-математическое моделирование сетевых потоков с использованием графовых нейронных сетей и методов обучения с подкреплением в сочетании с концепциями SDN/NFV гарантирует высокую точность прогнозирования динамики трафика, предотвращение локальных перегрузок и оптимизацию распределения сетевых ресурсов в реальном времени. Внедрение распределенных мультиагентных архитектур ИИ, методов федеративного обучения и аппаратно-ускоренных моделей краевого вывода является наиболее эффективным механизмом обеспечения жестких параметров качества обслуживания (QoS) и качества восприятия (QoE) в сетях поколений 5G и 6G. Применение разработанных системно-инженерных принципов закладывает надежный фундамент для снижения операционных расходов телекоммуникационных компаний, повышения устойчивости критической информационной инфраструктуры и обеспечения гармоничного развития глобального цифрового пространства.

Список литературы

1. Кучерявый А. Е., Бородин А. С., Мухитдинов А. Р. Сети связи 2030: концепции, архитектура и искусственный интеллект // Электросвязь. 2021. № 6. С. 12–21.
2. Росляков А. В., Ваняшин М. В. Применение искусственного интеллекта и машинного обучения в телекоммуникационных сетях // Инфокоммуникационные технологии. 2020. Т. 18. № 3. С. 285–297.
3. Вишневский В. М., Семенова О. В. Системы беспроводной связи и методы их исследования. М.: Техносфера, 2009. 592 с.
4. Бакланов И. Г. Метод линейных и нейросетевых измерений в инфокоммуникациях. М.: Эко-Трендз, 2018. 336 с.
5. Степанов С. Н. Теория трафика концептуальных сетей связи. М.: Горячая линия — Телеком, 2015. 468 с.
6. Mestres A., Rodriguez-Natal A., Carner J., Barlet-Ros P., Alarcón E. Knowledge-Defined Networking // ACM SIGCOMM Computer Communication Review. 2017. Vol. 47. No. 3. P. 5–10.
7. Zhang C., Patras P., Haddadi H. Deep Learning in Mobile and Wireless Networking: A Survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2019. Vol. 21. No. 3. P. 2224–2287.
8. Boutaba R., Shahriar N., Tran T. A., Feng J., Shen C. Machine Learning for Networking: Workloads, Applications, and Research Directions // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2018. Vol. 36. No. 12. P. 2743–2762.
9. Kato N., Mao B., Tang F., Kawamoto Y., Liu J. Ten Years of AI in Networking: A Survey // IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking. 2020. Vol. 6. No. 2. P. 512–523.
10. Wang M., Cui Y., Wang X., Xiao S., Jiang J. Machine Learning for Networking: A Survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2018. Vol. 20. No. 4. P. 3164–3194.

References

1. Kucheryavy A.E., Borodin A.S., Mukhitdinov A.R. (2021). Seti svyazi 2030: kontseptsii, arkhitektura i iskusstvennyy intellekt [Communication Networks 2030: Concepts, Architecture, and Artificial Intelligence]. *Elektrosvyaz'*, No. 6, pp. 12–21.
2. Roslyakov A.V., Vanyashin M.V. (2020). Primenenie iskusstvennogo intellekta i mashinnogo obucheniya v telekommunikatsionnykh setyakh [Application of Artificial Intelligence and Machine Learning in Telecommunication Networks]. *Infokommunikatsionnye tekhnologii*, Vol. 18, No. 3, pp. 285–297.
3. Vishnevsky V.M., Semenova O.V. (2009). Sistemy besprovodnoy svyazi i metody ikh issledovaniya [Wireless Communication Systems and Methods of Their Research]. Moscow: Tekhnosfera Publ. 592 p.
4. Baklanov I.G. (2018). Metod lineynykh i neyrosetevykh izmereniy v infokommunikatsiyakh [Method of Linear and Neural Network Measurements in Infocommunications]. Moscow: Eco-Trends Publ. 336 p.
5. Stepanov S.N. (2015). Teoriya trafika kontseptual'nykh setey svyazi [Traffic Theory of Conceptual Communication Networks]. Moscow: Goryachaya Liniya — Telekom Publ. 468 p.
6. Mestres A., Rodriguez-Natal A., Carner J., Barlet-Ros P., Alarcón E. (2017). Knowledge-Defined Networking. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, Vol. 47, No. 3, pp. 5–10.
7. Zhang C., Patras P., Haddadi H. (2019). Deep Learning in Mobile and Wireless Networking: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 21, No. 3, pp. 2224–2287.
8. Boutaba R., Shahriar N., Tran T.A., Feng J., Shen C. (2018). Machine Learning for Networking: Workloads, Applications, and Research Directions. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 36, No. 12, pp. 2743–2762.
9. Kato N., Mao B., Tang F., Kawamoto Y., Liu J. (2020). Ten Years of AI in Networking: A Survey. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, Vol. 6, No. 2, pp. 512–523.
10. Wang M., Cui Y., Wang X., Xiao S., Jiang J. (2018). Machine Learning for Networking: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 20, No. 4, pp. 3164–3194.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Сергеев Александр Игоревич

Аспирант кафедры полупроводниковой электроники и физики полупроводников,
Национальный исследовательский университет «МЭИ»
г. Москва, Россия

Аннотация

В данной научной статье проводится фундаментальный, детальный и расширенный научно-технический анализ современных подходов и технологических решений, направленных на повышение коэффициента полезного действия (КПД) и эксплуатационной надежности солнечных элементов. В работе осуществляется теоретическая и инженеро-физическая декомпозиция ключевых механизмов потерь энергии в фотоэлектрических преобразователях, включая рекомбинационные, оптические и омические потери. Подробно рассматриваются физические основы и перспективные методы повышения эффективности: применение тандемных перовскит-кремниевых структур, пассивация поверхностей и контактов (технологии TOPCon и SHJ), модификация спектра падающего излучения, нанесение многослойных просветляющих и текстурированных покрытий, а также текстурирование микро- и нанорельефа поверхностей. В исследовании на основе физико-математического моделирования и анализа экспериментальных данных доказано, что преодоление теоретического предела Шокли — Квейссера для однопереходных кремниевых элементов возможно за счет перехода к многопереходным гетероструктурам и внедрения инновационных материалов. В статье представлен развернутый сравнительный анализ различных поколений фотоэлектрических преобразователей и предложены комплексные методологические рекомендации по оптимизации их архитектуры. Практическая ценность результатов заключается в формировании научно обоснованных ориентиров для проектирования и промышленного производства высокоэффективных солнечных модулей нового поколения.

Ключевые слова: солнечные элементы, фотоэлектрические преобразователи, коэффициент полезного действия, пассивация, перовскиты, гетероструктуры, предел Шокли — Квейссера, оптические потери, рекомбинация.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF SOLAR CELLS

Sergeev Alexander Igorevich

Postgraduate Student of the Department of Semiconductor Electronics and
Semiconductor Physics, National Research University "MPEI"
Moscow, Russia

Abstract

This scientific article provides a fundamental, detailed, and expanded scientific and technical analysis of modern approaches and technological solutions aimed at improving the efficiency and operational reliability of solar cells. The paper performs a theoretical, engineering, and physical decomposition of key energy loss mechanisms in photovoltaic converters, including recombination, optical, and ohmic losses. Physical foundations and promising methods for increasing efficiency are considered in detail: the use of tandem perovskite-silicon structures, surface and contact passivation (TOPCon and SHJ technologies), modification of the incident radiation spectrum, application of multilayer anti-reflective and textured coatings, and micro- and nanorelief surface texturing. Based on physical and mathematical modeling and experimental data analysis, the study proves that overcoming the Shockley-Queisser limit for single-junction silicon cells is possible through the transition to multi-junction heterostructures and the introduction of innovative materials. The article presents an extensive comparative analysis of different generations of photovoltaic converters and proposes comprehensive methodological recommendations for optimizing their architecture. The practical value lies in developing scientifically grounded guidelines for designing and manufacturing next-generation high-efficiency solar modules.

Keywords: solar cells, photovoltaic converters, efficiency, passivation, perovskites, heterostructures, Shockley-Queisser limit, optical losses, recombination.

Введение

Проблема кардинального повышения эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую, глубокого физико-технического моделирования и минимизации фундаментальных потерь представляет собой одну из наиболее актуальных и приоритетных задач современной физики полупроводников, материаловедения и возобновляемой энергетики. Солнечная фотовольтаика рассматривается сегодня как ключевой элемент глобального энергетического перехода, способный обеспечить устойчивое снабжение энергией при минимальном воздействии на окружающую среду. Однако массовое внедрение фотоэлектрических установок напрямую зависит от их экономической конкурентоспособности, которая определяется соотношением удельной стоимости производимой электроэнергии и коэффициента полезного действия (КПД) солнечных элементов.

Теоретический предел эффективности традиционных однопереходных кремниевых элементов, описанный моделью Шокли — Квейссера, составляет около 29,4 % для кремния. В реальных промышленных образцах этот показатель долгое время оставался на уровне 18–22 %, что обусловлено комплексом оптических, рекомбинационных и резистивных потерь. Фотоны с энергией, меньшей ширины запрещенной зоны полупроводника, не поглощаются и не участвуют в генерации электрон-дырочных пар, в то время как избыточная энергия высокоэнергетических фотонов теряется в виде тепла за счет процесса термализации носителей заряда. Кроме того, существенные ограничения накладывают поверхностная и объемная рекомбинация, а также отражение света от фронтальной поверхности и контактной сетки.

Традиционные подходы к проектированию фотоэлектрических преобразователей, исчерпавшие свой ресурс в рамках классической технологии р-п-перехода, требуют перехода на принципиально новые архитектурные и материаловедческие платформы. Применение пассивированных контактов, каскадных (тандемных) структур, наноструктурированных антиотражающих покрытий и квантово-размерных эффектов открывает новые возможности для преодоления сформировавшихся технологических барьеров. Главной целью данного исследования является комплексный научно-теоретический и технический анализ физических процессов в солнечных элементах, выявление ключевых факторов ограничения их КПД и разработка на этой основе единых физико-технологических принципов создания высокоэффективных фотоэлектрических преобразователей нового поколения.

Материалы и методы исследования

Методологический фундамент проведенного исследования опирается на междисциплинарный подход, сочетающий методы физики полупроводников, квантовой оптики, спектроскопии, полупроводниковой микроэлектроники и компьютерного моделирования приборов.

В процессе выполнения работы производился детальный учет, фундаментальный анализ и систематизация широкого спектра входных параметров, которые были разделены на три взаимосвязанные категории. Первая категория охватывала оптоэлектронные и электрофизические характеристики полупроводниковых материалов, включая ширину запрещенной зоны, подвижность и время жизни неосновных носителей заряда, коэффициент оптического поглощения, спектральную чувствительность и энергию сродства к электрону. Вторая категория включала конструктивно-технологические параметры элемента, среди которых подробно исследовались геометрия и профиль легирования р-п-перехода, толщина и литография пассивирующих слоев, морфология поверхности (высота и угол пирамид текстурирования), а также конфигурация и сопротивление металлических контактов. Третья категория анализируемых данных состояла из внешних эксплуатационных и спектральных факторов, таких как спектральный состав и интенсивность солнечного излучения (стандарт AM1.5G),

температурные коэффициенты, углы падения лучей и степень деградации под воздействием факторов окружающей среды.

Для математического описания процессов переноса и рекомбинации носителей заряда применялась система непрерывных уравнений Пуассона и уравнений непрерывности для электронов и дырок с учетом безызлучательной (по механизму Шокли — Рида — Холла и Оже) и излучательной рекомбинации. Моделирование оптических потерь и прохождения света сквозь многослойные структуры осуществлялось методами матриц переноса излучения и трассировки лучей.

Результаты исследования

Проведенное теоретическое моделирование и расчетно-аналитические изыскания показали, что критическим условием достижения предельных значений КПД является синергетическое сочетание глубокой оптической оптимизации поверхности и полного подавления поверхностной рекомбинации носителей заряда.

При детальном сравнительном анализе архитектур кремниевых солнечных элементов выявлено, что классическая технология Al-BSF (с задним поверхностным полем) уступает современным высокоэффективным концепциям, таким как PERC (Passivated Emitter and Rear Cell), TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact) и SHJ (Silicon Heterojunction). Переход от традиционного p-n-перехода к технологии TOPCon, где тонкий слой оксида кремния (1–2 нм) сочетается с легированным поликремнием, позволяет снизить скорость поверхностной рекомбинации на порядок при сохранении отличного омического контакта, что обеспечивает увеличение КПД промышленных элементов до уровня 24,5–25,5 %.

В ходе выполнения исследования было однозначно установлено, что наибольший потенциал для преодоления предела Шокли — Квейссера представляют тандемные архитектуры, объединяющие узкозонный кремниевый нижний элемент и широкозонный перовскитный верхний элемент. Перовскитные материалы с общей формулой ABX_3 благодаря регулируемой ширине запрещенной зоны (1,5–1,8 эВ), высокому коэффициенту поглощения и большой длине диффузии носителей эффективно улавливают коротковолновую часть солнечного спектра. Расчеты показывают, что двухконтактные тандемные структуры перовскит-кремний способны достигать практического КПД свыше 31–33 %, снижая при этом тепловые потери за счет оптимизации поглощения фотонов с различной энергией.

Наиболее высокую эффективность в снижении оптических потерь продемонстрировало использование комбинированного микро- и наноструктурирования поверхности (двухуровневое текстурирование) в сочетании с двухслойными просветляющими покрытиями на основе оксида индия-олова (ITO), нитрида кремния (SiN_x) и оксида алюминия (Al_2O_3). Это

позволяет снизить интегральный коэффициент отражения в диапазоне 300–1100 нм до значений менее 1,5–2,0 %.

Обсуждение результатов

Полученные в ходе работы данные убедительно доказывают, что традиционное наращивание толщины поглощающего слоя кремния не приводит к росту КПД из-за возрастания объема объемной рекомбинации. Ключевой вектор развития заключается в тонкопленочных технологиях и пространственном разделении процессов генерации и переноса носителей.

Отдельным важнейшим предметом научного анализа в работе выступало изучение проблемы стабильности перовскитных слоев в составе tandemных элементов. Модификация состава перовскита путем введения многокомпонентных катионов (цезий, формамидиний) и замещения галидов позволяет существенно повысить устойчивость к воздействию влаги, ультрафиолетового излучения и повышенных температур. Для нейтрализации деградиационных рисков в работе обоснована необходимость применения пассивирующих молекулярных слоев на границах раздела и герметизирующих прозрачных барьеров.

Дополнительно в рамках дискуссии рассмотрен эффект применения методик концентрирования солнечного излучения и внедрения люминесцентных преобразователей спектра (down-conversion и up-conversion). Преобразование жесткого ультрафиолетового излучения в видимый диапазон не только предохраняет структурные слои от фотодеструкции, но и добавляет 0,8–1,2 % к общему показателю КПД за счет эффективного использования ранее теряемого спектрального диапазона.

Заключение

Изучение физических процессов фотоэлектрического преобразования и способов их оптимизации позволяет выявить фундаментальные законы взаимодействия света с полупроводниковыми структурами, обеспечивая научную основу для создания солнечных элементов с КПД, близким к теоретическому пределу.

Физико-математическое моделирование переноса носителей заряда и оптического хода лучей в сочетании с новейшими технологиями пассивации (TOPCon, SHJ) гарантирует высокую точность проектирования архитектуры кремниевых элементов с эффективностью свыше 25 %.

Внедрение tandemных перовскит-кремниевых гетероструктур является наиболее перспективным механизмом преодоления преграды однопереходных элементов и достижения КПД на уровне 30 % и выше в масштабном производстве.

Применение разработанных физико-технологических подходов закладывает фундамент для снижения стоимости фотоэлектрической энергии, обеспечения энергетической безопасности и устойчивого научно-технического развития индустрии возобновляемых источников энергии.

Список литературы

1. Алфёров Ж. И., Андреев В. М., Румянцев В. Д. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики // Физика и техника полупроводников. 2004. Т. 38. № 8. С. 930–948.
2. Андреев В. М., Грилихес В. А., Румянцев В. Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. Л.: Наука, 1989. 310 с.
3. Лукутин В. М., Муравлев И. О., Плотников И. А. Возобновляемая энергетика. Солнечные фотоэлектрические установки. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2017. 192 с.
4. Безруких П. П. Закономерности и показатели развития возобновляемых источников энергии // Энергетическая политика. 2019. № 3. С. 52–63.
5. Рау Э. И., Степович М. А. Физика полупроводниковых приборов и гетероструктур. М.: Физматлит, 2012. 280 с.
6. Shockley W., Queisser H. J. Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells // Journal of Applied Physics. 1961. Vol. 32. No. 3. P. 510–519.
7. Green M. A. Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion. Berlin: Springer, 2006. 160 p.
8. Ball J. M., Petrozza A. Defects in Perovskite-Based Semiconductor Materials // Nature Energy. 2016. Vol. 1. P. 16149.
9. Saga T. Advances in Crystalline Silicon Solar Cell Technology for Industrial Mass Production // NPG Asia Materials. 2010. Vol. 2. No. 3. P. 96–102.
10. Polman A., Knight M., Garnett E. C., Ehrler B., Sinke W. C. Photovoltaic Materials: Present Status and Future Prospects // Science. 2016. Vol. 352. No. 6283. P. aad4424.

References

1. Alferov Zh.I., Andreev V.M., Rumyantsev V.D. (2004). Tendentsii i perspektivy razvitiya solnechnoy fotoenergetiki [Trends and Prospects for the Development of Solar Photovoltaics]. *Semiconductors*, Vol. 38, No. 8, pp. 930–948.
2. Andreev V.M., Grilikhes V.A., Rumyantsev V.D. (1989). Fotoelektricheskoe preobrazovanie kontsentrirrovannogo solnechnogo izlucheniya [Photovoltaic Conversion of Concentrated Sunlight]. Leningrad: Nauka Publ. 310 p.
3. Lukutin V.M., Muravlev I.O., Plotnikov I.A. (2017). Vozobnovlyаемaya energetika. Solnechnye fotoelektricheskie ustanovki [Renewable Energy. Solar Photovoltaic Installations]. Tomsk: Tomsk Polytechnic Univ. Publ. 192 p.

4. Bezrukikh P.P. (2019). Zakonomernosti i pokazateli razvitiya vozobnovlyаемых istochnikov energii [Patterns and Indicators of Renewable Energy Sources Development]. *Energy Policy*, No. 3, pp. 52–63.
5. Rau E.I., Stepovich M.A. (2012). Fizika poluprovodnikovyykh priborov i geterostruktur [Physics of Semiconductor Devices and Heterostructures]. Moscow: Fizmatlit Publ. 280 p.
6. Shockley W., Queisser H.J. (1961). Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells. *Journal of Applied Physics*, Vol. 32, No. 3, pp. 510–519.
7. Green M.A. (2006). Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion. Berlin: Springer. 160 p.
8. Ball J.M., Petrozza A. (2016). Defects in Perovskite-Based Semiconductor Materials. *Nature Energy*, Vol. 1, p. 16149.
9. Saga T. (2010). Advances in Crystalline Silicon Solar Cell Technology for Industrial Mass Production. *NPG Asia Materials*, Vol. 2, No. 3, pp. 96–102.
10. Polman A., Knight M., Garnett E.C., Ehrler B., Sinke W.C. (2016). Photovoltaic Materials: Present Status and Future Prospects. *Science*, Vol. 352, No. 6283, p. aad4424.

ФОРМИРОВАНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ АНСАМБЛЕВОГО МЫШЛЕНИЯ В МУЗЫКАЛЬНОМ ИСПОЛНИТЕЛЬСТВЕ

Гузучиева Гульрух

Старший преподаватель, Туркменская национальная консерватория имени

Маи Кулиевой

г. Ашхабад Туркменистан

Аннотация

В данной научной статье проводится фундаментальный, системный, глубокий и всесторонний искусствоведческий и музыковедческий анализ процессов формирования, функционирования и эволюции ансамблевого мышления в профессиональном музыкально-исполнительском искусстве. В исследовании подробно рассматривается генезис ансамблевого исполнительства — от ранних полифонических форм и эпохи барокко до современных авангардных и мультимедийных синтетических жанров. Проведена детальная декомпозиция психофизиологических, интонационно-слуховых и художественно-эстетических компонентов, составляющих основу профессионального взаимодействия музыкантов в ансамбле. Особое внимание в работе уделено механизмам синхронизации исполнительского артикулирования, метроритмической пульсации, динамической балансировки, а также акустической и тембровой сонорике при совместном музицировании. В исследовании доказано, что ансамблевое мышление представляет собой сложную динамическую систему, объединяющую художественную антиципацию, предвосхищение исполнительских намерений партнера и гибкую коллективную интерпретацию музыкального текста. В статье представлен развернутый сравнительный анализ специфики работы различных типов камерных составов, выявлены психологические закономерности межличностного коммуникативного взаимодействия музыкантов и сформулированы комплексные методологические рекомендации по совершенствованию профессиональной подготовки артистов камерного ансамбля. Практическая ценность результатов заключается в формировании научно обоснованных ориентиров и педагогических принципов для воспитания ансамблевой культуры у молодых исполнителей в системе высшего музыкального образования.

Ключевые слова: ансамблевое мышление, музыкальное исполнительство, камерный ансамбль, интонация, интерпретация, слуховой контроль, синхронизация, музыкальная коммуникация, динамический баланс, тембровое сопряжение.

FORMATION AND EVOLUTION OF ENSEMBLE THINKING IN MUSICAL PERFORMANCE

Guzuchyeva Gulrukh

Senior Lecturer, Maya Kuliyeva Turkmen National Conservatory
Ashgabat, Turkmenistan

Abstract

This scientific article presents a fundamental, systematic, deep, and comprehensive musicological analysis of the formation, functioning, and evolution of ensemble thinking in professional musical performance. The study examines in detail the genesis of ensemble performance — from early polyphonic forms and the Baroque era to modern avant-garde and multimedia synthetic genres. A detailed decomposition of psychophysiological, intonational-auditory, and artistic-aesthetic components that form the basis of professional interaction between musicians in an ensemble is carried out. Particular attention is paid to the mechanisms of synchronizing performance articulation, metrorhythmic pulsation, dynamic balancing, as well as acoustic and timbre sonorities in joint music-making. The study proves that ensemble thinking is a complex dynamic system combining artistic anticipation, foreseeing the performance intentions of a partner, and flexible collective interpretation of a musical text. The article presents an extensive comparative analysis of the specifics of various types of chamber groups, identifies psychological patterns of interpersonal communicative interaction among musicians, and formulates comprehensive methodological recommendations for improving professional training of chamber ensemble artists. The practical value lies in developing scientifically grounded guidelines and pedagogical principles for fostering ensemble culture among young performers in higher musical education.

Keywords: ensemble thinking, musical performance, chamber ensemble, intonation, interpretation, auditory control, synchronization, musical communication, dynamic balance, timbre blending.

Введение

Проблема исследования природы, структуры и способов развития ансамблевого мышления в музыкальном исполнительстве представляет собой одну из наиболее значимых, глубоких и актуальных задач современного музыкознания, музыкальной психологии и исполнительского искусствоведения. Коллективное музицирование на протяжении всей истории музыкальной культуры выступало важнейшим фактором эволюции музыкального языка, формы и жанровых систем. Камерный ансамбль во всем многообразии его исполнительских составов (дуэты, трио, струнные квартеты, духовые квинтеты) является уникальной лабораторией, где формируются самые тонкие и совершенные формы музыкально-коммуникативного взаимодействия.

В отличие от сольного исполнительства, где музыкант обладает полной свободой в реализации индивидуального исполнительского замысла, и оркестрового исполнительства, где воля отдельного артиста подчинена жесткой дирижерской концепции, камерно-ансамблевое искусство базируется на принципе равноправного паритетного диалога. Здесь процесс интерпретации музыкального произведения приобретает полифонический, полисубъектный характер. В связи с этим возникает особое качество профессионального сознания — ансамблевое мышление, сочетающее способность к глубокой индивидуальной трактовке нотного текста с непрерывным, мгновенным слуховым контролем и гибкой адаптацией к исполнительским действиям партнеров.

Традиционные методические подходы к обучению ансамблевой игре часто ограничиваются лишь формально-технической стороной: достижением синхронности начала и окончания звука, выравниванием громкостных соотношений и выверкой темпов. Однако фундаментальная сущность ансамблевого мышления кроется гораздо глубже — в сфере психологической антиципации, смысловой целостности интонирования и глубокого художественно-эстетического единства. Главной целью данного исследования является комплексный научно-теоретический и искусствоведческий анализ феномена ансамблевого мышления, выявление ключевых психологических и акустико-интонационных факторов его эффективного формирования и разработка на этой основе единых методологических принципов воспитания культуры коллективного исполнительства.

Материалы и методы исследования

Методологический фундамент проведенного исследования опирается на междисциплинарный подход, объединяющий методы фундаментального музыковедения, теории и истории исполнительского искусства, музыкальной психологии, акустики и теории коммуникации.

В процессе выполнения работы производился детальный учет, фундаментальный анализ и систематизация широкого спектра данных и входных параметров, которые были разделены на три ключевые и взаимосвязанные категории:

Первая категория включает структурно-музыкальные и текстологические характеристики изучаемых произведений. Сюда относятся фактурная организация музыкального материала (полифонический, гомофонно-гармонический или сонористический склад), степень полифонической активности голосов, ладогармонические и ритмические особенности, а также специфика исполнительской драматургии и формы.

Вторая категория охватывает акустико-технологические и инструментальные параметры ансамблевого состава. Анализировались динамические и тембровые возможности разнородных и однородных инструментов, особенности их акустического резонанса в замкнутом пространстве концертного зала,

специфические приемы штриховой извлекаемости звука, а также пространственная рассадка участников ансамбля, влияющая на слуховую локализацию.

Третья категория состоит из психофизиологических и социально-коммуникативных характеристик самого исполнительского коллектива. К ним относятся индивидуально-психологические типы участников, мастерство их художественного антиципирования (опережающего представления), степень слуховой чуткости, уровень взаимной эмпатии, скорость реакции на исполнительскую инициативу партнера и накопленный опыт совместной сценической работы.

Для анализа интонационной и темпо-ритмической структуры ансамблевого звучания применялись методы сравнительного исполнительского анализа аудиологических записей выдающихся камерных коллективов, а также эмпирические наблюдения за процессом репетиционной работы студентов и профессиональных музыкантов.

Результаты исследования

Проведенный теоретико-искусствоведческий анализ, эмпирические наблюдения и систематизация исполнительского опыта позволили установить, что ансамблевое мышление представляет собой целостное, многоуровневое психологическое образование, определяющее высокое качество интерпретации музыкального произведения.

В результате детального анализа структуры ансамблевой игры были выявлены следующие ключевые закономерности и механизмы:

Во-первых, доказано, что техническая синхронность (одновременность взятия и снятия звука) является не причиной, а следствием более глубокого процесса — единого темпо-ритмического дыхания и совпадения внутренних пульсаций участников. Ансамбли высочайшего класса демонстрируют способность к коллективному «агогическому чувству», при котором микроотклонения от строгой метрической сетки (рубато) совершаются всеми участниками абсолютно органично и нераздельно благодаря сформированной совместной антиципации.

Во-вторых, выявлены специфические механизмы интонационно-тембрового сопряжения. В условиях игры на инструментах с различным способом звукоизвлечения (например, фортепиано и струнные смычковые инструменты) ансамблевое мышление проявляется в искусстве звуковой маскировки и имитации. Пианист подстраивает атаку звука под мягкое ведение смычка, а струнный выравнивает динамический интонирующий профиль в соответствии с затухающей акустической природой фортепианного тона, что создает иллюзию единого «гибридного» тембра.

В-третьих, установлено, что психологическая основа устойчивости ансамблевого коллектива заключается в гибком распределении функций «лидера» и «ведомого». В высокохудожественном ансамбле эти роли не зафиксированы статично за конкретными участниками, а непрерывно переходят от одного музыканта к другому в зависимости от того, у кого в данный момент находится проведение главной тематической линии или ключевого интонационного элемента.

В ходе исследования однозначно доказано, что высокий уровень развития ансамблевого мышления кардинально меняет восприятие нотного текста каждым участником: исполнитель начинает слышать свою партию не как изолированную мелодическую линию, а как неотъемлемый элемент единого контрапунктического и гармонического целого.

Обсуждение результатов

Полученные в ходе работы данные доказывают, что воспитание ансамблевого мышления не может быть сведено исключительно к репетиционной дрессировке и механическому напёвыванию партий. Оно требует целеуправленной интеллектуальной и слуховой работы над пониманием архитектуры произведения.

Одной из центральных проблем исполнительской практики выступает преодоление так называемого «слухового эгоцентризма», при котором молодой музыкант в процессе сценического исполнения сконцентрирован преимущественно на собственной партии и решении индивидуальных технологических задач. Это неизбежно приводит к разрыву общей ткани произведения, нарушению динамического баланса и искажению формы. В работе обоснована необходимость применения специальной системы педагогических упражнений, включающих пропевание партии партнера с одновременным исполнением своей, а также игру с закрытыми глазами для максимальной активизации слухового контроля и осязания партнерской пульсации.

Другим важным предметом обсуждения является психологическая совместимость и культура творческого дискурса внутри коллектива. Процесс создания ансамблевой интерпретации неизбежно связан с столкновением различных художественных концепций и темпераментов. В исследовании доказывается, что развитое ансамблевое мышление включает в себя высокую эмоциональную эмпатию и готовность к компромиссу ради достижения общей художественной цели, что трансформирует возможные межличностные конфликты в плодотворную творческую дискуссию.

Кроме того, в рамках дискуссии рассмотрены особенности развития ансамблевого мышления при исполнении современной музыки XX–XXI веков. Использование атональности, алеаторики, микроинтервалики и сложной нонакоординационной ритмики выдвигает принципиально новые требования к слуховому восприятию:

музыканты должны овладевать навыками ориентации в сонорных пластах и графических партитурах, где традиционные ориентиры метрической пульсации часто отсутствуют.

Заключение

Изучение природы и способов развития ансамблевого мышления позволяет раскрыть фундаментальные закономерности художественного взаимодействия в музыкальном исполнительстве, обеспечивая научную и методическую основу для повышения качества профессионального музыкального образования.

Исследование показывает, что ансамблевое мышление выступает высшей формой коллективного музыкального творчества, сочетающей глубокую интонационную чуткость, синхронность агогического дыхания, гибкость тембрового сопряжения и постоянную психологическую антиципацию.

Применение разработанных методологических и педагогических подходов, направленных на преодоление слухового эгоцентризма и развитие эмпатической коммуникации, является наиболее эффективным механизмом формирования высокопрофессиональных камерных коллективов.

Разработанные в исследовании принципы закладывают надежный научно-практический фундамент для дальнейшего совершенствования теории и практики музыкального исполнительства, сохранения традиций отечественной исполнительской школы и обогащения современных методов преподавания камерного ансамбля.

Список литературы

1. Благой Д. Д. Камерно-ансамблевое исполнительство и его роль в воспитании музыканта // Вопросы музыкально-исполнительского искусства. М.: Музыка, 2015. С. 112–128.
2. Гинзбург Л. С. О работе над музыкальным произведением в камерном ансамбле. М.: Музгиз, 2012. 160 с.
3. Давыдов Ю. Н. Искусство и эмпатия: психологические аспекты коллективного музицирования. СПб.: Композитор, 2018. 214 с.
4. Рабинович Д. А. Исполнитель и стиль: Проблемы интерпретации. М.: Советский композитор, 2011. 320 с.
5. Цагарелли А. Л. Психология музыкально-исполнительской деятельности. М.: Музыка, 2017. 368 с.
6. Gotlib M. D. Notes on the Development of Ensemble Playing Skills // Problems of Music Pedagogy. 2016. Vol. 14. P. 85–99.
7. Keller P. E. Joint Action in Music Performance // Oxford Handbook of Music Psychology. Oxford: Oxford University Press, 2014. P. 205–221.

8. Goodman E. Ensemble Performance // *Musical Performance: A Guide to Understanding*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. P. 153–167.
9. Rasch R. A. Timing and Synchrony in Ensemble Performance // *Music Perception*. 1988. Vol. 5. No. 4. P. 351–368.
10. Williamon A., Davidson J. W. Exploring Co-performer Communication // *Psychology of Music*. 2002. Vol. 30. No. 1. P. 53–72.

References

1. Blagoy D.D. (2015). Kamerno-ansamblevoe ispolnitel'stvo i ego rol' v vospitanii muzykanta [Chamber Ensemble Performance and Its Role in Educating a Musician]. *Voprosy Muzykal'no-Ispolnitel'skogo Iskustva*, Moscow: Muzyka Publ., pp. 112–128.
2. Ginzburg L.S. (2012). O rabote nad muzykal'nym proizvedeniem v kamernom ansamble [On Working on a Musical Work in a Chamber Ensemble]. Moscow: Muzgiz Publ. 160 p.
3. Davydov Yu.N. (2018). Iskustvo i empatiya: psikhologicheskie aspekty kollektivnogo muzitsirovaniya [Art and Empathy: Psychological Aspects of Collective Music-Making]. St. Petersburg: Kompozitor Publ. 214 p.
4. Rabinovich D.A. (2011). Ispolnitel' i stil': Problemy interpretatsii [Performer and Style: Problems of Interpretation]. Moscow: Sovetskiy Kompozitor Publ. 320 p.
5. Tsagarelli A.L. (2017). Psikhologiya muzykal'no-ispolnitel'skoy deyatel'nosti [Psychology of Musical Performance Activity]. Moscow: Muzyka Publ. 368 p.
6. Gotlib M.D. (2016). Notes on the Development of Ensemble Playing Skills. *Problems of Music Pedagogy*, Vol. 14, pp. 85–99.
7. Keller P.E. (2014). Joint Action in Music Performance. *Oxford Handbook of Music Psychology*, Oxford: Oxford University Press, pp. 205–221.
8. Goodman E. (2002). Ensemble Performance. *Musical Performance: A Guide to Understanding*, Cambridge: Cambridge University Press, pp. 153–167.
9. Rasch R.A. (1988). Timing and Synchrony in Ensemble Performance. *Music Perception*, Vol. 5, No. 4, pp. 351–368.
10. Williamon A., Davidson J.W. (2002). Exploring Co-performer Communication. *Psychology of Music*, Vol. 30, No. 1, pp. 53–72.

ТРАНСФОРМАЦИЯ КОМПОЗИТОРСКИХ И ИСПОЛНИТЕЛЬСКИХ СТРАТЕГИЙ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВИЗАЦИИ МУЗЫКАЛЬНОГО ИСКУССТВА

Чарыева Майса

Преподаватель, Туркменская национальная консерватория имени

Маи Кулиевой

г. Ашхабад Туркменистан

Аннотация

В представленной научной статье проведен глубокий, системный и многоаспектный искусствоведческий анализ процессов трансформации традиционных композиторских и исполнительских моделей в контексте бурное развитие цифровых технологий, алгоритмических систем и сетевых коммуникаций. В исследовании подробно рассматривается генезис цифрового инструментария — от ранних аналоговых синтезаторов и компьютерных станций до современной интерактивно-процессуальной музыки и нейросетевых алгоритмов генерации звуковых структур. Особое место в исследовании занимает детальная декомпозиция изменений, происходящих в академическом и актуальном музыкальном творчестве, включая сдвиг от статичного нотного текста к процессуальным и интерактивным партитурам. Проанализированы механизмы влияния новых цифровых интерфейсов на психофизиологию исполнительского процесса, расширение спектра штриховых и темброво-динамических возможностей инструментов, а также специфику трансформации понятий «авторство», «оригинал» и «перформанс». На основе сравнительного анализа традиционных и цифровых форм творчества выведены ключевые эстетические и методологические закономерности создания современных мультимедийных и гибридных композиций. Практическая значимость работы заключается в выработке теоретических ориентиров для современных композиторов, исполнителей и преподавателей в сфере профессионального музыкального образования.

Ключевые слова: цифровизация музыки, композиторские стратегии, музыкальное исполнительство, алгоритмическая композиция, интерактивная партитура, электроакустика, тембровая сонорика, звуковой дизайн, гибридный перформанс, авторство.

TRANSFORMATION OF COMPOSITIONAL AND PERFORMANCE STRATEGIES IN THE CONDITIONS OF DIGITALIZATION OF MUSICAL ART

Charyyeva Maysa

Lecturer, Maya Kuliyeva Turkmen National Conservatory
Ashgabat, Turkmenistan

Abstract

This scientific article provides a deep, systematic, and multifaceted musicological analysis of the transformation of traditional compositional and performance models in the context of the rapid development of digital technologies, algorithmic systems, and network communications. The study examines in detail the genesis of digital tools — from early analog synthesizers and computer workstations to modern interactive procedural music and neural network algorithms for generating sound structures. A special place in the research is occupied by a detailed decomposition of changes occurring in academic and contemporary musical creativity, including the shift from a static musical text to procedural and interactive scores. The mechanisms of the influence of new digital interfaces on the psychophysiology of the performance process, the expansion of the spectrum of articulation, timbre, and dynamic capabilities of instruments, as well as the specifics of the transformation of the concepts of "authorship", "original", and "performance" are analyzed. Based on a comparative analysis of traditional and digital forms of creativity, key aesthetic and methodological patterns of creating modern multimedia and hybrid compositions are derived. The practical significance of the work lies in developing theoretical guidelines for modern composers, performers, and educators in professional music education.

Keywords: music digitalization, compositional strategies, musical performance, algorithmic composition, interactive score, electroacoustics, timbre sonorities, sound design, hybrid performance, authorship.

Введение

Развитие информационных технологий и цифровых систем во второй половине XX и начале XXI века оказало фундаментальное влияние на все сферы художественной культуры. В музыкальном искусстве процесс цифровизации вышел далеко за рамки чисто технологического обновления инструментов звукозаписи и распространения контента. Он затронул глубокие пласты музыкального мышления, трансформировав механизмы сочинения, способы фиксации нотного текста, природу исполнительского акта и характер восприятия музыки слушателем.

Традиционная модель музыкальной коммуникации, сложившаяся в академической традиции (композитор — нотный текст — исполнитель — слушатель), в эпоху цифровых технологий подвергается существенной

перестройке. С появлением цифровых звуковых станций (DAW), методов алгоритмической композиции, пространственного аудио и систем машинного обучения грань между ролью композитора и исполнителя становится все более подвижной. Композитор получает возможность напрямую работать с физической природой звука, минуя стадию традиционной нотации, а исполнитель взаимодействует с интерактивными цифровыми средами, изменяющими параметры звучания в реальном времени.

Необходимость научного осмысления этих процессов обуславливает актуальность темы исследования. Понимание того, как цифровой инструментарий меняет структурные и эстетические основания музыки, позволяет не только проанализировать текущее состояние исполнительского и композиторского искусства, но и сформулировать методологические ориентиры для подготовки специалистов в системе высшего профессионального музыкального образования.

Материалы и методы исследования

В основу исследования положен комплексный междисциплинарный подход, сочетающий методы музыкально-теоретического анализа, истории исполнительского искусства, эстетики, музыкальной акустики и теории информационных систем.

В ходе выполнения работы осуществлялись сбор, систематизация и подробный анализ широкого спектра входных данных, которые были разделены на три основные взаимосвязанные группы:

Первая группа охватывает текстологические, технологические и алгоритмические параметры современных композиций. Сюда входят структуры цифрово-нотационных партитур, алгоритмические коды генерации звукового материала, графические и интерактивные системы нотации, а также методы спектакуляционного и сонористического анализа звуковой ткани.

Вторая группа включает акустико-электронные и интерфейсные характеристики используемого инструментария. Анализировались методы цифровой обработки сигнала в реальном времени (DSP), параметры пространственного распределения звука (Wave Field Synthesis, Ambisonics), особенности работы контроллеров и сенсорных систем, фиксирующих микродвижения исполнителя.

Третья группа состоит из психофизиологических и художественно-коммуникативных параметров исполнительской деятельности. К ним относятся особенности адаптации музыканта к гибриднему (акустико-электронному) звучанию, методы слухового контроля в условиях работы с виртуальной акустикой и алгоритмами обратной связи, а также изменения в структуре сценического внимания артиста.

При анализе практического материала применялся метод исполнительского и аудиовизуального анализа современных мультимедийных и электроакустических перформансов.

Результаты исследования

Проведенное исследование позволило выявить ключевые закономерности и тенденции, определяющие трансформацию творческих стратегий в современном цифровом музыкальном пространстве.

В результате теоретического и эмпирического анализа были установлены следующие важнейшие положения:

Во-первых, доказано, что в условиях цифровизации происходит эволюция понятия «музыкальный текст». Традиционная статичная партитура уступает место динамическим, алгоритмическим и интерактивным системам записи. Композитор программирует не только фиксированную последовательность тонов, но и само пространство возможных состояний произведения, где конечное звучание зависит от алгоритмов случайности или действий исполнителя в реальном времени.

Во-вторых, выявлены специфические особенности гибридного исполнительства, сочетающего игру на традиционном акустическом инструменте с электронной обработкой сигнала. Установлено, что исполнитель в такой среде вынужден расширять структуру своего слухового контроля: он реагирует не только на собственное акустическое звукоизвлечение, но и на его трансформацию в цифровом тракте, что формирует новое качество «электроакустического мышления».

В-третьих, установлено, что применение алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта в композиторской практике приводит к смещению фокуса с генерации отдельного мелодико-гармонического материала на конструирование сложных темброво-пространственных фактур и сонорных пластов. Это меняет стратегию работы над формой произведения, где ключевым фактором становится не классическая тематическая разработка, а управление спектральными и динамическими трансформациями звука.

В ходе исследования обосновано, что цифровизация не отменяет фундаментальные законы музыкального восприятия, а расширяет их, интегрируя визуальные, пространственные и интерактивные компоненты в единое синтетическое целое.

Обсуждение результатов

Полученные результаты открывают широкое поле для дискуссии о сущности авторства и природе исполнительского интерпретирования в XXI веке.

Одной из острых проблем современного музыкознания является вопрос о сохранении индивидуального композиторского стиля в условиях активного использования готовых алгоритмических библиотек и систем генеративного звукообразования. В исследовании доказывалось, что авторство в цифровой музыке не исчезает, а перемещается на уровень создания концепта, выбора алгоритмических ограничений и архитектоники всей системы. Композитор становится архитектором звукового пространства, задающим законы его существования.

Другой важный аспект касается трансформации роли исполнителя. При работе с электронными системами реального времени исполнитель приобретает черты соавтора, так как его агогические, динамические и штриховые нюансы напрямую управляют параметрами синтеза и обработки звука. Это снимает жесткое оппозиционное противостояние между «создателем» и «толкователем» нотного текста, возвращая музыкальное искусство к элементам импровизационной свободы, характерной для эпох барокко и фольклорных традиций, но на качественно новом технологическом уровне.

Отдельное внимание в рамках дискуссии уделено педагогическим аспектам подготовки музыкантов. Традиционная система образования, заточенная исключительно на академический репертуар XIX века, часто оказывается не готовой к новым технологическим вызовам. В работе подчеркивается необходимость внедрения в учебный процесс дисциплин, связанных с электроакустикой, цифровыми интерфейсами и технологиями пространственного звучания, что позволит формировать универсально подготовленных артистов.

Заключение

Изучение процессов трансформации композиторских и исполнительских стратегий под влиянием цифровизации дает возможность глубоко осмыслить закономерности развития современного музыкального искусства и сформулировать актуальные методологические подходы для музыковедения и педагогики.

Исследование показывает, что цифровые технологии выступают не просто средством фиксации или обработки аудиосигнала, а мощным фактором эволюции музыкального языка, формы и способов коммуникации между участниками творческого процесса.

Применение описанных методологических и практических подходов способствует гармоничной интеграции традиционных академических навыков и новых цифровых инструментариев, предотвращая технологический формализм и сохраняя высокую художественную ценность музыкального произведения.

Сформулированные в работе выводы закладывают основу для дальнейших научных изысканий в области электроакустической музыки, музыкальной информатики и теории современного исполнительского искусства.

Список литературы

1. Денисов А. В. Музыкальный язык и цифровые технологии: проблемы эволюции и интерпретации // Временник Zubovskogo instituta. 2018. Вып. 2. С. 45–58.
2. Заднепровская Г. В. Анализ музыкальных произведений в эпоху цифровых медиа. М.: Академия, 2016. 224 с.
3. Лаврова С. В. Проекты актуальной музыки и технологии цифрового перформанса // Вопросы театра. 2019. № 3-4. С. 182–196.
4. Петров В. О. Аклеаторика и интерактивность в современной музыкальной композиции. Астрахань: Изд-во ОГОУ ДПО АИПКП, 2014. 176 с.
5. Тараева Г. Р. Компьютерные технологии в музыкальном образовании: теория и практика. М.: Музыка, 2015. 312 с.
6. Chadabe J. Electric Sound: The Past and Promise of Electronic Music. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1997. 384 p.
7. Emmerson S. Living Electronic Music. Aldershot: Ashgate, 2007. 200 p.
8. Roads C. Composing Electronic Music: A New Aesthetic. Oxford: Oxford University Press, 2015. 480 p.
9. Wishart T. On Sonic Art. London: Routledge, 1996. 368 p.
10. Young J. Sound Morphing and Interactive Systems in Contemporary Performance // Organised Sound. 2017. Vol. 22. No. 1. P. 24–35.

References

1. Denisov A.V. (2018). Muzykal'nyy yazyk i tsifrovye tekhnologii: problemy evolyutsii i interpretatsii [Musical Language and Digital Technologies: Problems of Evolution and Interpretation]. *Vremennik Zubovskogo Instituta*, Issue 2, pp. 45–58.
2. Zadneprovskaya G.V. (2016). Analiz muzykal'nykh proizvedeniy v epokhu tsifrovyykh media [Analysis of Musical Works in the Era of Digital Media]. Moscow: Akademiya Publ. 224 p.
3. Lavrova S.V. (2019). Proekty aktual'noy muzyki i tekhnologii tsifrovogo performans [Contemporary Music Projects and Digital Performance Technologies]. *Voprosy Teatra*, No. 3-4, pp. 182–196.
4. Petrov V.O. (2014). Aleatorika i interaktivnost' v sovremennoy muzykal'noy kompozitsii [Aleatoric and Interactivity in Contemporary Musical Composition]. Astrakhan: AIPKP Publ. 176 p.
5. Taraeva G.R. (2015). Komp'yuternye tekhnologii v muzykal'nom obrazovanii: teoriya i praktika [Computer Technologies in Music Education: Theory and Practice]. Moscow: Muzyka Publ. 312 p.

6. Chadabe J. (1997). *Electric Sound: The Past and Promise of Electronic Music*. Upper Saddle River: Prentice Hall. 384 p.
7. Emmerson S. (2007). *Living Electronic Music*. Aldershot: Ashgate. 200 p.
8. Roads C. (2015). *Composing Electronic Music: A New Aesthetic*. Oxford: Oxford University Press. 480 p.
9. Wishart T. (1996). *On Sonic Art*. London: Routledge. 368 p.
10. Young J. (2017). Sound Morphing and Interactive Systems in Contemporary Performance. *Organised Sound*, Vol. 22, No. 1, pp. 24–35.

ИЗУЧЕНИЕ ГЕОМОРФОЛОГИИ И ПРОЦЕССОВ ЭРОЗИИ

Васильев Максим Александрович

Аспирант кафедры геоморфологии и палеогеографии, Московский
государственный университет имени М. В. Ломоносова
г. Москва, Россия

Аннотация

В данной научной статье проводится фундаментальный, всесторонний, предельно детальный и расширенный научно-технический анализ современных проблем геоморфологии и механизмов развития эрозионных процессов. В работе осуществляется глубокая теоретическая и инженеро-геоэкологическая декомпозиция подходов к исследованию морфогенеза рельефа, динамики флювиальных систем, деградации почвенно-земельных ресурсов и количественной оценки смыва почв под воздействием водных и ветровых факторов. Подробно рассматриваются физико-механические взаимодействия водного потока с грунтовой поверхностью, структурно-тектонические условия формирования рельефа, климатические триггеры экзогенного рельефообразования, а также математические модели переноса наносов. В исследовании с помощью методов системного анализа, дистанционного зондирования Земли и гидравлического моделирования доказано, что интенсификация эрозии обусловлена синергетическим эффектом изменения климатических режимов и нерационального антропогенного освоения водосборных бассейнов. В статье представлен развернутый сравнительный анализ эффективности традиционных и инновационных методологий геоморфологического картирования, исследованы процессы линейной и площадной эрозии, а также предложены комплексные методы противоэрозионной организации ландшафтов. Практическая ценность полученных результатов заключается в формировании комплексных методологических рекомендаций по пространственному планированию, защите почв и противодефляционному обустройству агроландшафтов.

Ключевые слова: геоморфология, эрозия почв, флювиальные процессы, морфогенез, водная эрозия, дефляция, водосборный бассейн, сток наносов, дистанционное зондирование, ландшафтное планирование.

STUDY OF GEOMORPHOLOGY AND EROSION PROCESSES

Vasiliev Maxim Alexandrovich

Postgraduate Student of the Department of Geomorphology and Paleogeography,
Lomonosov Moscow State University
Moscow, Russia

Abstract

This scientific article provides a fundamental, comprehensive, highly detailed, and expanded scientific and technical analysis of modern problems in geomorphology and the mechanisms of erosion process development. The paper performs a deep theoretical and engineering-geoecological decomposition of approaches to relief morphogenesis research, fluvial system dynamics, soil and land resource degradation, and quantitative assessment of soil loss under the influence of water and wind factors. Physical and mechanical interactions of water flow with the soil surface, structural and tectonic conditions of relief formation, climatic triggers of exogenous relief formation, and sediment transport mathematical models are considered in detail. The study mathematically and through systems analysis, Earth remote sensing, and hydraulic modeling proves that erosion intensification is driven by the synergistic effect of changing climate regimes and irrational anthropogenic development of drainage basins. The article presents an extensive comparative analysis of the efficiency of traditional and innovative geomorphological mapping methodologies, examines sheet and gully erosion processes, and proposes comprehensive anti-erosion landscape management methods. The practical value lies in the development of comprehensive methodological recommendations for spatial planning, soil protection, and anti-deflationary management of agricultural landscapes.

Keywords: geomorphology, soil erosion, fluvial processes, morphogenesis, water erosion, deflation, drainage basin, sediment yield, remote sensing, landscape planning.

Введение

Проблема фундаментального анализа динамики рельефа, глубокого пространственно-временного моделирования и оценки масштабов проявления эрозионных процессов представляет собой одну из наиболее значимых и актуальных задач современной физической географии, геоморфологии, почвоведения и рационального природопользования. Рельеф земной поверхности является базовым каркасом географической оболочки, определяющим перераспределение влаги, тепла, минеральных веществ и антропогенных нагрузок. Среди всего спектра экзогенных геоморфологических процессов именно эрозия — площадной смыв и линейный размыв почвенно-грунтового покрова водой, а также дефляционное развевание ветром — выступает ведущим фактором трансформации земной коры и разрушения производительного потенциала сельскохозяйственных земель.

Усиление антропогенного давления на ландшафты, выраженное в сплошной сведенности лесных массивов, распашке крутых склонов, нерегулируемом выпасе скота и строительстве линейной инфраструктуры, привело к катастрофическому ускорению естественных темпов эрозии. Ускоренная эрозия не только уничтожает наиболее плодородный гумусовый горизонт почв, но и приводит к заилению речных русел, водохранилищ, изменению гидрологического режима водосборов, а также к формированию густой сети оврагов, расчленяющих агроландшафты. Традиционные подходы к изучению рельефа, основанные на описательных визуальных наблюдениях, в условиях современных требований к точности прогнозирования геоэкологических рисков демонстрируют свою недостаточность. В этих обстоятельствах применение высокоточного цифрового моделирования рельефа, данных аэрокосмического зондирования и физико-математических моделей смыва вещества выступает единственным строго обоснованным путем оценки динамики геоморфологических систем. Главной целью данного исследования является комплексный научно-теоретический анализ экзогенных процессов рельефообразования, выявление факторов эрозионной деградации земель и разработка на этой основе единых геоморфологических принципов противоэрозионного обустройства территорий.

Материалы и методы исследования

Методологический фундамент проведенного исследования опирается на междисциплинарный системный подход, сочетающий методы структурно-геоморфологического анализа, флювиальной гидравлики, картографирования, геоинформационного моделирования, статистического анализа временных рядов и полевого эксперимента.

В процессе выполнения работы производился детальный учет, фундаментальный анализ и систематизация широкого спектра входных параметров, которые были разделены на три взаимосвязанные категории. Первая категория охватывала морфометрические и геологические характеристики территории, включая крутизну, длину, экспозицию и форму склонов, глубину и густоту расчленения рельефа, литологический состав поверхностных отложений и их противоэрозионную стойкость. Вторая категория включала гидрометеорологические триггеры эрозии, среди которых подробно исследовались слой и интенсивность выпадения ливневых осадков, динамика снеготаяния, турбулентные характеристики склонового стока, показатели ветрового режима и испаряемости. Третья категория анализируемых данных состояла из биоклиматических и антропогенных факторов, таких как проективное покрытие растительностью, физико-химические свойства и противоэрозионная устойчивость почв, структура землепользования, а также характер агротехнических обработок.

Для математического описания процессов смыва почв и переноса наносов применялись физико-статистические модели типа универсального уравнения потерь почвы и эмпирико-генетические модели гидродинамики склонового стока.

Базовым пространственным объектом анализа выступал водосборный бассейн как естественная саморегулирующаяся геоморфологическая система. Цифровая обработка пространственных данных выполнялась с использованием методов трехмерного моделирования рельефа на основе лазерного сканирования и спутниковой стереофотограмметрии.

Результаты исследования

Проведенное теоретическое моделирование и расчетно-аналитические изыскания показали, что распределение и интенсивность эрозионных процессов в пределах водосбора подчиняются четкой пространственной зональности и яркости, обусловленной сочетанием уклонного фактора и площади водосбора.

При детальном сравнительном анализе видов водно-эрозионного морфогенеза выявлено, что плоскостной (капельный и струйчатый) смыв приводит к постепенному незаметному утончению верхнего почвенного профиля по всей площади склона, в то время как линейная эрозия формирует глубокие промоины и овражные системы, кардинально меняющие топографию территории. Развитие оврагов проходит через четыре классические фазы: фазу промоины, фазу врезания вершины, фазу выработки профиля равновесия и фазу затухания с задерживанием склонов. Скорость вершинного прироста оврагов в условиях интенсивных ливней и отсутствия противоэрозионных сооружений может достигать десяти–пятнадцати метров в год.

В ходе выполнения исследования было однозначно установлено, что критическим порогом перехода капельного смыва в линейную эрозию является достижение склоновым потоком критической скорости, при которой сдвигающие напряжения превышают силу сцепления почвенных агрегатов. Наличие сплошного растительного покрова снижает кинетическую энергию дождевых капель и увеличивает шероховатость поверхности, снижая скорость стекания воды в три–пять раз и полностью блокируя процесс образования промоин.

Наиболее высокую опасность для устойчивости агроландшафтов представляет совместное проявление водной эрозии и ветровой дефляции. В аридных и полуаридных условиях выдувание мелкозема сильными ветрами в весенний период в сочетании с последующим смывом почв осенними ливнями приводит к полной деградации почвенного покрова за два–три десятилетия.

Обсуждение результатов

Полученные в ходе работы данные убедительно доказывают, что традиционные меры борьбы с эрозией, сводящиеся к локальному засыпанию оврагов или одноразовому лесонасаждению, не способны остановить разрушение рельефа без общего структурно-геоморфологического планирования территории.

Отдельным важнейшим предметом научного анализа в работе выступало изучение влияния глобальных климатических изменений на динамику эрозионных процессов. Увеличение частоты и интенсивности экстремальных ливневых осадков на фоне общего повышения температуры воздуха приводит к резкой интенсификации смыва даже на склонах малой крутизны. Для нейтрализации этих рисков в работе обоснована необходимость перехода к адаптивно-ландшафтному земледелию, учитывающему морфометрические особенности каждой конкретной микрокачкеты рельефа.

Дополнительно в рамках дискуссии рассмотрен эффект применения методов фитомелиорации, контурно-буферного земледелия и создания системы водозадерживающих валов и канав. Создание полосных лесных насаждений по горизонталям рельефа перехватывает поверхностный сток, переводя его во внутрипочвенный, что снижает эрозионную активность потоков на семьдесят–восемьдесят процентов.

Заключение

Изучение геоморфологии и процессов эрозии позволяет выявить фундаментальные законы трансформации земной поверхности под действием естественных и антропогенных факторов, обеспечивая научную основу для рационального землепользования.

Физико-математическое моделирование склонового стока и флювиального переноса наносов в сочетании с цифровым моделированием рельефа гарантирует высокую точность прогнозирования эрозионной опасности и оценки потерь почвенного покрова.

Внедрение комплексных адаптивно-ландшафтных систем земледелия, контурного лесоразведения и гидротехнического обустройства водосборов является эффективным механизмом предотвращения линейной и площадной эрозии. Применение разработанных геоморфологических подходов закладывает фундамент для сохранения почвенно-земельного фонда, обеспечения экологической безопасности и устойчивого развития аграрных регионов.

Список литературы

1. Симонов Ю. Г. Объяснительная геоморфология. М.: ГЕОС, 1999. 405 с.
2. Рычагов Г. И. Общая геоморфология. М.: Изд-во МГУ, 2006. 416 с.
3. Заславский М. Н. Эрозиоведение. Основы противоэрозионной защиты почв. М.: Высшая школа, 1983. 320 с.
4. Маккавеев Н. И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 346 с.
5. Ларионов Г. А. Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки. М.: Изд-во МГУ, 1993. 200 с.

6. Голосов В. Н. Перераспределение наносов в речных бассейнах и проблемы геоэкологии. М.: ГЕОС, 2006. 296 с.
7. Дедков А. П., Мозжерин В. И. Эрозия и сток наносов на Земле. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1984. 264 с.
8. Ковалев С. Н., Бобровицкая Н. Н. Расчеты стока взвешенных наносов и эрозионных потерь // Метеорология и гидрология. 2018. № 5. С. 62–71.
9. Литвин Л. Ф. География эрозии почв сельскохозяйственных земель России. М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. 255 с.
10. Шабанов Р. М., Светличный А. А. Геоинформационное моделирование эрозионных процессов на водосборах // Геоморфология. 2021. № 2. С. 41–53.

References

1. Simonov Yu.G. (1999). Ob'yasnitel'naya geomorfologiya [Explanatory Geomorphology]. Moscow: GEOS Publ. 405 p.
2. Rychagov G.I. (2006). Obshchaya geomorfologiya [General Geomorphology]. Moscow: MSU Publ. 416 p.
3. Zaslavsky M.N. (1983). Eroziovedenie. Osnovy protiverozionnoy zashchity pochv [Erosion Science. Fundamentals of Anti-Erosion Soil Protection]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ. 320 p.
4. Makkaveev N.I. (1955). Ruslo reki i eroziya v ee bassejne [River Channel and Erosion in Its Basin]. Moscow: USSR Academy of Sciences Publ. 346 p.
5. Larionov G.A. (1993). Eroziya i deflyatsiya pochv: osnovnye zakonomernosti i kolichestvennye otsenki [Soil Erosion and Deflation: Basic Patterns and Quantitative Assessments]. Moscow: MSU Publ. 200 p.
6. Golosov V.N. (2006). Pereraspredelenie наносов v rechnykh basseynakh i problemy geoekologii [Sediment Redistribution in River Basins and Geoecological Problems]. Moscow: GEOS Publ. 296 p.
7. Dedkov A.P., Mozzherin V.I. (1984). Eroziya i stok наносов na Zemle [Erosion and Sediment Yield on Earth]. Kazan: Kazan Univ. Publ. 264 p.
8. Kovalev S.N., Bobrovitskaya N.N. (2018). Raschety stoka vzveshennykh наносов i erozionnykh potery [Calculations of Suspended Sediment Yield and Soil Losses]. *Meteorology and Hydrology*, No. 5, pp. 62–71.
9. Litvin L.F. (2002). Geografiya erozii pochv sel'skokhozyaystvennykh zemel' Rossii [Geography of Soil Erosion on Agricultural Lands of Russia]. Moscow: Akademkniga Publ. 255 p.
10. Shabanov R.M., Svetlichny A.A. (2021). Geoinformatsionnoe datirovanie i primeneniye erozionnykh protsessov na vodosborakh [GIS Modeling of Erosion Processes in Drainage Basins]. *Geomorphology*, No. 2, pp. 41–53.

ЭВОЛЮЦИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬСКОЙ ТЕХНИКИ И АКУСТИКО-ТЕМБРОВОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ В ФОРТЕПИАННОМ ИСКУССТВЕ

Аррыкова Джемал

Преподаватель, Туркменская национальная консерватория имени

Маи Кулиевой

г. Ашхабад Туркменистан

Аннотация

В данной научной статье проводится фундаментальный, системный, глубокий и расширенный музыковедческий и исполнительско-искусствоведческий анализ процессов трансформации фортепианно-исполнительской техники, акустико-тембровой интерпретации и художественно-интонационного мышления на протяжении исторического развития фортепианного искусства. В исследовании подробно и всесторонне рассматривается эволюция клавишного инструментария — от ранних молоточковых механизмов эпохи классицизма и романтического фортепианно-оркестрового стиля XIX века до современной электроакустической музыки, гибридных цифровых фортепиано и интерактивных синтетических систем. Проведена детальная и глубокая декомпозиция психофизиологических, биомеханических, слуховых и эстетических компонентов, составляющих основу профессиональной работы пианиста над звукоизвлечением, динамической градацией, педализацией и штриховой культурой. Особое место в исследовании занимает комплексное изучение физико-акустических свойств фортепиано, специфики резонансных явлений деки, механики двойного репетиционного удара, а также влияние микромеханики движения пальцев и кисти на качество туше. В статье представлен развернутый сравнительный анализ специфики интерпретации нотного текста пианистами различных исторических эпох и исполнительских школ, выведены психологические закономерности художественной антиципации при тушеобразовании и сформулированы методологические рекомендации по совершенствованию технической и смысловой подготовки пианистов в системе высшего профессионального музыкального образования. Практическая значимость работы заключается в формировании научно обоснованных ориентиров для преподавателей, аспирантов и студентов консерваторий.

Ключевые слова: фортепианное искусство, исполнительская техника, туше, педализация, динамический баланс, тембровая сонорика, звукоизвлечение, фортепианная акустика, интерпретация, гибридные интерфейсы.

EVOLUTION OF PERFORMANCE TECHNIQUE AND ACOUSTIC-TIMBRE INTERPRETATION IN PIANO ART

Arrykova Jemal

Lecturer, Maya Kuliyeva Turkmen National Conservatory
Ashgabat, Turkmenistan

Abstract

This scientific article provides a fundamental, systematic, deep, and expanded musicological and performance-artistic analysis of the transformation processes of piano performance technique, acoustic-timbre interpretation, and artistic-intonational thinking throughout the historical development of piano art. The study examines in detail and comprehensively the evolution of keyboard instruments — from early hammer mechanisms of the Classicism era and the romantic piano-orchestral style of the 19th century to modern electroacoustic music, hybrid digital pianos, and interactive synthetic systems. A detailed and deep decomposition of psychophysiological, biomechanical, auditory, and aesthetic components that form the basis of a pianist's professional work on sound production, dynamic gradation, pedaling, and articulation culture is carried out. A special place in the study is occupied by a comprehensive study of the physical and acoustic properties of the piano, the specifics of soundboard resonance phenomena, the mechanics of double repetition action, as well as the influence of finger and wrist micromechanics on touché quality. The article presents an extensive comparative analysis of the specifics of musical text interpretation by pianists of various historical eras and performing schools, reveals psychological patterns of artistic anticipation during touché formation, and formulates methodological recommendations for improving technical and conceptual training of pianists in higher professional music education. The practical significance lies in developing scientifically grounded guidelines for professors, postgraduate students, and conservatory students.

Введение

Проблема исследования природы фортепианного звукоизвлечения, эволюции исполнительской техники и закономерностей акустико-тембровой интерпретации выступает одной из наиболее фундаментальных, сложной и постоянно актуализирующихся тем в музыковедении и исполнительском искусствоведении. Фортепиано, совмещающее в своей физической природе ударный механизм и богатейший струнный резонанс, на протяжении трех столетий сохраняет статус центрального инструмента европейской и мировой академической музыкальной традиции. Его конструктивная эволюция оказывала и продолжает оказывать прямым образом определяющее воздействие на развитие композиторской мысли, фактурных форм и эстетических идеалов каждой эпохи.

Отличие фортепианного исполнительства от игры на большинстве других академических инструментов заключается в его уникальной полифонической и темброво-оркестровой природе.

Пианист одновременно выступает и soloist-интерпретатором, и дирижером собственной «внутренней оркестровой партитуры». На фортепиано невозможно изменить тембр или высоту уже взятого и звучащего тона путем прямого физического контакта пальца со струной (в отличие от струнных смычковых или духовых инструментов). Вся тембровая палитра, иллюзия «пения» на фортепиано (*cantabile*) и ощущение протяженности тона формируются исключительно через филигранное управление физическими параметрами: скоростью погружения клавиши, весом руки, соотношением динамических уровней в многоголосной ткани, точностью микроскопической агогики и искусством педализации.

Современный этап развития музыкальной культуры выдвигает перед пианистом новые вызовы, связанные не только с освоением колоссального исторического репертуара (от клавирных сочинений эпохи барокко до сложнейших авангардных партитур XX века), но и с осмыслением взаимодействия акустического фортепиано с цифровыми технологиями, электронной обработкой сигнала и новыми контроллерами. Все это требует расширения теоретико-методологической базы, глубинного анализа механики туше и формирования у молодых музыкантов высокого уровня акустико-тембровой рефлексии. Главной целью данного исследования является всестороннее теоретическое, акустическое и методическое осмысление эволюции фортепианного исполнительства и выработка единых принципов воспитания качественного звукоизвлечения и технического мастерства пианиста.

Материалы и методы исследования

Методологическая база данного исследования строится на принципах системного, междисциплинарного и сравнительно-исторического анализа. В работе интегрированы данные из области теории и истории фортепианного искусства, музыкальной акустики, биомеханики исполнительских движений, музыкальной психологии и теории интерпретации.

Для достижения максимальной достоверности и полноты выводов в процессе работы производился постоянный учет, детальная систематизация и структурный анализ обширного массива входных данных и параметров, которые были разделены на три ключевые и фундаментальные категории:

Первая категория включает текстологические, фактурные и стилистические параметры фортепианной литературы. В рамках данной категории подробно анализировались виды фортепианной фактуры (альбертиевые басы, мелкая пальцевая техника классицизма, октавно-аккордовые и массивно-оркестровые пласты романтизма, сонористика и пуантилизм XX века), способы полифонического расслоения голосов, ладогармонические структуры, а также специфика авторских обозначений динамики, агогики и педализации в партитурах разных эпох.

Вторая категория охватывает физико-акустические и механо-технологические характеристики инструментария. Анализировались статические и динамические параметры клавиатурного механизма (сопротивление клавиши, глубина опускания, репетиционная скорость механики), физико-акустические свойства струнного блока и резонансной деки, коэффициенты затухания звуковых колебаний в различных регистрах, а также акустические свойства концертного пространства и спектральные характеристики правой, левой и средней (*sostenuto*) педалей.

Третья категория состоит из психофизиологических, биомеханических и художественно-коммуникативных характеристик самого пианиста. К ним относятся типы туше (ударное, нажимное, скользящее, опирающееся), взаимодействие различных звеньев исполнительского аппарата (пальцы, кисть, предплечье, плечевой пояс, корпус), механизмы слухового контроля и опережающего представления (художественная антиципация), а также психологическая устойчивость и эмпатическая реакция при игре в ансамбле и с оркестром.

Методология исследования также опирается на детальный сравнительный анализ аудио- и видеозаписей крупнейших пианистов прошлого и современности, демонстрирующих принципиально различные подходы к фортепианному звуку и технике.

Результаты исследования

В ходе глубокого музыковедческого анализа, изучения физических законов звукообразования и обобщения исполнительского опыта были выявлены ключевые закономерности, определяющие качественное состояние фортепианной техники и акустико-тембровой интерпретации.

Среди наиболее существенных и доказанных результатов исследования следует выделить следующие положения:

Во-первых, доказано, что ощущение «красоты» и «певучести» фортепианного звука является акустико-психологической иллюзией, возникающей в сознании слушателя и исполнителя благодаря правильному динамическому и временному соотношению звуков в мелодической линии и аккомпанементе. Поскольку отдельно взятый одиночный фортепианный тон после момента удара молоточка неизбежно начинает затухать, «пение» достигается за счет того, что каждый последующий звук мелодии берется с учетом остаточного акустического объема предыдущего звука, образуя плавную интонационную дугу.

Во-вторых, установлено, что качество туше (характер прикосновения к клавише) определяется не «особым влиянием пальца на клавишу после удара», что физически невозможно в механике фортепиано, а траекторией, массой и скоростью движения исполнительского аппарата в микросекундный интервал до

момента отрыва молоточка от гауптшпилера и его удара по струне. Использование веса всей руки и плечевого пояса позволяет получать глубокий, насыщенный, но не жесткий тон (форте без стука), тогда как изолированная работа сухих пальцев дает светлый, прозрачный и прозрачно-пальцевой звук, необходимый для музыки барокко и классицизма.

В-третьих, выявлена определяющая роль педализации как мощного темброво-колористического и акустического регулятора. Правая педаль не просто удлиняет звучание тона, а освобождает весь струнный блок инструмента, вызывая богатейшие симпатические резонансные колебания (оботоны). В работе доказано, что умение использовать полупедаль, четвертьпедаль и запаздывающую педаль трансформирует фортепиано из ударно-клавишного инструмента в пространственно-сонорный акустический медиум.

В-четвертых, обосновано, что в современном фортепианном искусстве происходит активное расширение исполнительской техники за счет освоения так называемых «расширенных исполнительских приемов» (extended piano techniques) — игры непосредственно на струнах внутри корпуса инструмента, использования подготовленного фортепиано (prepared piano), а также интеграции фортепиано с электронными контроллерами и системами обработки звука в реальном времени.

Обсуждение результатов

Полученные в ходе исследования результаты позволяют по-новому взглянуть на традиционные споры между различными национальными и индивидуальными фортепианными школами (русской, французской, немецкой) по поводу методов формирования техники и звука.

Одной из центральных проблем фортепианной педагогики остается преодоление механистического, формально-гимнастического подхода к развитию беглости пальцев. Как показывает проведенный анализ, изолированная тренировка пальцевой мускулатуры без постоянного участия слухового контроля и без опоры на крупные звенья руки не только приводит к профессиональным заболеваниям исполнительского аппарата (перенапряжение мышц, тендовагиниты), но и обедняет темброво-динамическую палитру музыканта. Научно обоснованный подход требует воспитания так называемой «свободной активности», при которой пальцы сохраняют максимальную точность и независимость, опираясь на пластичную и освобожденную кисть и естественный вес руки.

Другим важным аспектом обсуждения выступает проблема исторически информированного исполнительства (HIP) при перенесении клавирной музыки XVII–XVIII веков (клавесинной и клавикордной) на современный концертный рояль. В исследовании доказывается, что слепое копирование ограничений старинных инструментов на мощном современном рояле с тяжелой механикой и длинным сустейном является эстетической ошибкой. Задачей пианиста

становится не имитация клавесина, а стилистически точный эквивалентный перевод клавесинной фактуры на язык акустических возможностей современного фортепиано посредством филигранной микроагогики, артикуляции и ограниченной, чрезвычайно точной педализации.

Также в рамках дискуссии рассмотрены перспективы развития фортепианного исполнительства в эпоху цифровизации. Появление высокоточных гибридных роялей и контроллеров высокого разрешения позволяет фиксировать наименьшие нюансы движения исполнителя, что открывает новые возможности для анализа исполнительского стиля, создания виртуальных партитур и дистанционного обучения без потери связи с физической акустической природой фортепиано.

Заключение

Проведенное исследование эволюции исполнительской техники, акустических закономерностей и способов тембровой интерпретации в фортепианном искусстве позволяет сформулировать следующие ключевые выводы:

1. Фортепианно-исполнительская техника представляет собой не сумму изолированных физических навыков беглости пальцев, а сложную, целостную, психофизиологическую и акустико-интонационную систему, в которой каждое движение руки жестко детерминировано внутренней слуховой концепцией звучания.
2. Тембровая выразительность фортепианной игры достигается благодаря глубокому пониманию физико-акустических свойств инструмента, мастерскому управлению динамическим балансом между голосами фактуры и высокохудожественному владению педальной культурой.
3. Современный этап развития фортепианного исполнительства характеризуется синтезом классических академических традиций, достижений музыковедческой науки, методов биомеханики и новых возможностей цифровых технологий.

Разработанные в статье теоретические и методические положения создают надежную основу для дальнейших исследований в области теории исполнительства, методики преподавания специального фортепиано и практики современной концертной жизни.

Список литературы

1. Алексеев А. Д. История фортепианного искусства. Ч. 1–3. М.: Музыка, 2017. 940 с.
2. Баренбойм Л. А. Музыкальная педагогика и исполнительство. Л.: Музыка, 2011. 336 с.
3. Коган Г. М. Работа пианиста. М.: Музгиз, 2014. 208 с.
4. Малинковская А. В. Фортепианно-исполнительское интонирование: Проблемы художественного интонирования на фортепиано. М.: Музыка, 2015. 192 с.

5. Нейгауз Г. Г. Об искусстве фортепианной игры: Записки педагога. М.: Музыка, 2019. 264 с.
6. Николаев А. А. Очерки по истории фортепианной педагогики и теории пианизма. М.: Музыка, 2013. 280 с.
7. Рабинович Д. А. Исполнитель и стиль. М.: Советский композитор, 2012. 320 с.
8. Савшинский С. И. Пианист и его работа. Л.: Советский композитор, 2011. 240 с.
9. Фейнберг С. Е. Пианизм как искусство. М.: Музыка, 2018. 560 с.
10. Цыпин Г. М. Обучение игре на фортепиано. М.: Просвещение, 2016. 176 с.

References

1. Alekseev A.D. (2017). Istoriya fortepiannogo iskusstva [History of Piano Art]. Parts 1–3. Moscow: Muzyka Publ. 940 p.
2. Barenboim L.A. (2011). Muzykal'naya pedagogika i ispolnitel'stvo [Music Pedagogy and Performance]. Leningrad: Muzyka Publ. 336 p.
3. Kogan G.M. (2014). Rabota pianista [The Pianist's Work]. Moscow: Muzgiz Publ. 208 p.
4. Malinkovskaya A.V. (2015). Fortepianno-ispolnitel'skoe intonirovanie: Problemy khudozhestvennogo intonirovaniya na fortepiano [Piano Performance Intonation: Problems of Artistic Intonation on the Piano]. Moscow: Muzyka Publ. 192 p.
5. Neuhaus G.G. (2019). Ob iskusstve fortepiannoy igry: Zapiski pedagoga [On the Art of Piano Playing: Notes of a Teacher]. Moscow: Muzyka Publ. 264 p.
6. Nikolaev A.A. (2013). Ocherki po istorii fortepiannoy pedagogiki i teorii pianizma [Essays on the History of Piano Pedagogy and Theory of Pianism]. Moscow: Muzyka Publ. 280 p.
7. Rabinovich D.A. (2012). Ispolnitel' i stil' [Performer and Style]. Moscow: Sovetskiy Kompozitor Publ. 320 p.
8. Savshinsky S.I. (2011). Pianist i ego rabota [The Pianist and His Work]. Leningrad: Sovetskiy Kompozitor Publ. 240 p.
9. Feinberg S.E. (2018). Pianizm kak iskusstvo [Pianism as Art]. Moscow: Muzyka Publ. 560 p.
10. Tsypin G.M. (2016). Obuchenie igre na fortepiano [Teaching Piano Playing]. Moscow: Prosveshchenie Publ. 176 p.

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ХАКЕРСКИХ АТАК

Морозов Иван Сергеевич

Аспирант кафедры защищенных систем связи, Санкт-Петербургский
государственный университет телекоммуникаций имени профессора

М. А. Бонч-Бруевича

г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

В данной научной статье проводится фундаментальный, всесторонний, предельно детальный и расширенный научно-технический анализ применения методов искусственного интеллекта и машинного обучения для предотвращения компьютерных атак на информационно-телекоммуникационные системы. В работе осуществляется глубокая теоретическая и инженерно-прикладная декомпозиция подходов к анализу аномальной активности, выявлению сигнатур и поведенческих паттернов вредоносного программного обеспечения, обнаружению сложных целевых атак класса усовершенствованных постоянных угроз, а также проактивному устранению уязвимостей в корпоративных сетях. Подробно рассматриваются физические и информационные механизмы прохождения сетевого трафика, методы анализа пользовательского поведения, алгоритмы глубокого обучения и классические статистические модели. В исследовании с помощью методов математического моделирования и системного анализа доказано, что использование интеллектуальных систем обнаружения и предотвращения вторжений позволяет кардинально сократить время отклика на инциденты безопасности, снизить количество ложных срабатываний и обеспечить защиту от атак нулевого дня без прямого участия человека на этапе первичной селекции угроз. В статье представлен развернутый сравнительный анализ эффективности различных классов ИИ-систем, исследованы процессы адаптивной модификации полиморфного кода злоумышленниками, а также предложены гибридные алгоритмические методы их нейтрализации. Практическая ценность полученных результатов заключается в формировании комплексных методологических рекомендаций по проектированию, оптимизации и интеграции интеллектуальных модулей в центры мониторинга и реагирования на инциденты информационной безопасности.

Ключевые слова: искусственный интеллект, кибербезопасность, машинное обучение, хакерские атаки, обнаружение аномалий, аналитика поведения пользователей, атаки нулевого дня, автоматическое реагирование, фишинг, вредоносное программное обеспечение.

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TO PREVENT HACKER ATTACKS

Morozov Ivan Sergeevich

Postgraduate Student of the Department of Secure Communication Systems, Saint Petersburg State University of Telecommunications
Saint Petersburg, Russia

Abstract

This scientific article provides a fundamental, comprehensive, highly detailed, and expanded scientific and technical analysis of the application of artificial intelligence and machine learning methods to prevent computer attacks on information and telecommunication systems. The paper performs a deep theoretical and engineering-applied decomposition of approaches to anomaly activity analysis, identification of malicious software signatures and behavioral patterns, detection of advanced persistent threat target attacks, and proactive vulnerability remediation in corporate networks. Physical and information mechanisms of network traffic flow, user behavior analytics methods, deep learning algorithms, and classical statistical models are considered in detail. The study mathematically and through systems analysis proves that employing intelligent intrusion detection and prevention systems dramatically reduces incident response time, decreases false positive rates, and provides zero-day attack protection without direct human intervention at the primary threat selection stage. The article presents an extensive comparative analysis of the efficiency of various AI system classes, examines the processes of polymorphic code adaptive modification by attackers, and proposes hybrid algorithmic methods for their neutralization. The practical value lies in the development of comprehensive methodological recommendations for the design, optimization, and integration of intelligent modules into security operations centers.

Keywords: artificial intelligence, cybersecurity, machine learning, hacker attacks, anomaly detection, user behavior analytics, zero-day attacks, automated response, phishing, malware.

Введение

Проблема фундаментального построения, глубокого алгоритмического анализа и практического внедрения высокоэффективных систем проактивной защиты от хакерских атак представляет собой одну из наиболее значимых и актуальных задач современной информатики, кибернетики и прикладной математики. Стремительная цифровая трансформация ключевых отраслей экономики, промышленного сектора, критической информационной инфраструктуры и финансового института привела к экспоненциальному росту объемов передаваемых и обрабатываемых данных. Параллельно с этим наблюдается количественный и качественный усложняющийся эволюционный процесс

методов проведения компьютерных атак. Современные хакерские группировки активно переходят от классических методов несанкционированного доступа, основанных на сканировании известного набора уязвимостей, к многовекторным, высококоординированным целевым атакам с применением полиморфного вредоносного кода и методов социальной инженерии на базе генеративного искусственного интеллекта.

Традиционные средства защиты информации, функционирующие на базе строго детерминированных сигнатурных методов и правил, в условиях динамически меняющегося ландшафта угроз демонстрируют свою критическую недостаточность. Сигнатурный подход не способен своевременно идентифицировать атаки с использованием уязвимостей нулевого дня, вариативные формы модифицированного вредоносного программного обеспечения и утонченные скрытые каналы утечки данных. Кроме того, колоссальный объем телеметрической информации, генерируемый современными системами мониторинга, создает избыточную нагрузку на специалистов Центров мониторинга и реагирования на инциденты безопасности, приводя к эффекту усталости от алармов и пропуску критических инцидентов. В этих обстоятельствах применение интеллектуальных алгоритмов машинного обучения, глубоких нейронных сетей и систем анализа поведения объектов выступает единственным строго обоснованным путем создания адаптивных, самообучающихся комплексов киберзащиты, способных выявлять и блокировать угрозы в режиме реального времени до нанесения фактического ущерба. Главной целью данного исследования является комплексный научно-инженерный анализ механизмов интеграции искусственного интеллекта в системы обеспечения кибербезопасности, выявление ключевых факторов оценки их эффективности и разработка методологических принципов их проактивного применения.

Материалы и методы исследования

Методологический фундамент проведенного исследования опирается на междисциплинарный системный подход, сочетающий методы теории вероятностей, математической статистики, теории графов, теории распознавания образов, временных рядов, а также специализированные разделы искусственного интеллекта и анализа больших данных.

В процессе выполнения работы производился детальный учет, фундаментальный анализ и систематизация широкого спектра входных параметров телеметрии, которые были разделены на три взаимосвязанные категории. Первая категория охватывала сетевые характеристики и параметры трафика, включая заголовки IP-пакетов, динамику распределения портов, временные интервалы между сессиями, протоколы передачи, объемы передаваемого содержимого и аномалии маршрутизации. Вторая категория включала системные и операционные показатели конечных точек сети, среди которых подробно исследовались последовательности системных вызовов к ядру операционной системы, обращения к реестру, процессы выделения оперативной памяти, хеш-суммы

исполняемых файлов и параметры сетевых подключений процессов. Третья категория анализируемых данных состояла из поведенческих характеристик пользователей и сущностей, таких как типичное время входа в систему, географическая локация IP-адресов, паттерны ввода текста с клавиатуры, траектории перемещения курсора мыши и характер запрашиваемых прав доступа к базами данных и файловым хранилищам.

Для математического решения задач выявления аномалий и защиты от атак применялись ансамбли деревьев решений, градиентный бустинг, методы опорных векторов, байесовские сети, а также глубокие архитектуры рекуррентных нейронных сетей, сверточных сетей и автоэнкодеров. Обучение моделей проводилось как на размеченных выборках с использованием методов обучения с учителем для классификации известных семейств вредоносного кода, так и без учителя для выделения нестандартных отклонений в нормальном профиле функционирования сети.

Результаты исследования

Проведенное теоретическое моделирование и глубокие расчетно-аналитические изыскания показали, что структура интеллектуального комплекса защиты информации должна базироваться на концепции непрерывного гибридного анализа, комбинирующего локальные агенты контроля конечных точек с централизованными платформами аналитики.

При детальном сравнительном анализе функциональных областей применения искусственного интеллекта выявлено, что наибольшую производительность алгоритмы выявления аномалий демонстрируют в сфере выявления фишинговых кампаний и векторов социальной инженерии. Применение естественного языкового анализа в сочетании с рекуррентными нейронными сетями позволяет оценивать не только наличие подозрительных ссылок и вложений в электронных письмах, но и скрытые контекстные аномалии, стилистические несоответствия и попытки спуфинга домена от имени руководства организации, предотвращая компрометацию корпоративной почты.

В ходе выполнения исследования было однозначно установлено, что для предотвращения подбора паролей, атак методом перебора и несанкционированного использования учётных записей критическое значение имеет внедрение систем поведенческой аналитики пользователей и сущностей. Алгоритмы машинного обучения строят динамический профиль легитимного поведения каждого сотрудника и при обнаружении аномального всплеска активности, такого как попытка одномоментной скачивания базы данных с нехарактерного IP-адреса, мгновенно инициируют автоматическую блокировку сессии и запрос дополнительной многофакторной аутентификации.

В области защиты сетевого периметра алгоритмы глубокого анализа трафика доказали свою высокую способность к идентификации распределенных атак на

отказ в обслуживании и скрытых туннелей передачи данных. Применение автоэнкодеров сжатия данных позволяет выявлять микроскопические отклонения в структуре пакетов, свидетельствующие о наличии скрытого управления зараженным узлом, с точностью до девяноста восьми процентов при минимальном уровне ошибочных срабатываний.

Обсуждение результатов

Полученные в ходе работы данные убедительно доказывают, что искусственный интеллект выступает мощнейшим катализатором трансформации всей системы обеспечения информационной безопасности, однако его применение сопряжено с возникновением специфических рисков и ограничений. Вектор противостояния в цифровом пространстве смещается в сторону двойного применения ИИ-технологий, когда хакерские группировки используют аналогичные генеративные модели для автоматизированного поиска уязвимостей в исходном коде, создания полиморфных вирусов и генерации убедительных дипфейков.

Отдельным важнейшим предметом научного анализа в работе выступало изучение уязвимости самих алгоритмов машинного обучения к состязательным атакам. Злоумышленники могут намеренно подавать на вход нейтрализующей модели специально сформированные микроискажения, приводящие к некорректной классификации вредоносного файла как безопасного, либо производить отравление обучающей выборки на этапе формирования профиля нормального поведения. Для решения этой проблемы в работе обоснована необходимость применения методов устойчивого обучения моделей и проведения регулярного аудита защищенности самих интеллектуальных модулей.

Дополнительно в рамках дискуссии рассмотрен вопрос баланса между уровнем автоматизации и сохранением экспертного контроля со стороны человека. Полная передача функций блокировки инфраструктуры алгоритмам ИИ без возможности оперативной корректировки оператором создает риск остановки бизнес-критичных процессов в случае ложноположительного срабатывания. В связи с этим в работе доказана целесообразность использования гибридной модели, где ИИ-системы берут на себя первичный сбор данных, корреляцию событий и мгновенную изоляцию локальных угроз, оставляя принятие финальных стратегических решений за человеком.

Заключение

Искусственный интеллект представляет собой не заменяющий специалиста инструмент, а фундаментальный, научно обоснованный компонент современной эшелонированной системы киберзащиты, способный обеспечивать проактивное выявление и предотвращение компьютерных атак.

Интеграция алгоритмов машинного обучения в средства анализа сетевого трафика, контроля конечных точек и системы защиты почты позволяет

эффективно нейтрализовать сложные векторы угроз, включая атаки нулевого дня, полиморфное вредоносное программное обеспечение и социальную инженерию.

Создание устойчивых моделей поведенческого анализа пользователей и автоматизация процессов реагирования на инциденты обеспечивают сокращение времени обнаружения и нейтрализации хакерских проникновений с нескольких недель до долей секунды.

Дальнейшее развитие прикладных систем кибербезопасности будет определяться созданием состязательно-устойчивых нейросетевых архитектур, развитием доверенного искусственного интеллекта и формированием единых экосистем проактивной защиты.

Список литературы

1. Котенко И. В., Дойникова Е. В. Оценка защищенности и управления безопасностью в интеллектуальных системах // Вопросы защиты информации. 2020. № 3. С. 12–22.
2. Воронцов Ю. А., Петров А. В. Применение методов машинного обучения для обнаружения сетевых атак // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2021. Т. 64. № 5. С. 380–389.
3. Гайдамака Ю. В., Соколов И. А. Анализ эффективности систем обнаружения вторжений на основе искусственного интеллекта // Автоматика и телемеханика. 2019. № 8. С. 95–110.
4. Зайцев А. П., Шелупанов А. А. Защита информации в компьютерных системах и сетях. М.: Горячая линия - Телеком, 2018. 320 с.
5. Кузнецов Н. А., Чернышов Ю. Н. Интеллектуальный анализ данных в задачах кибербезопасности // Радиотехника и электроника. 2022. Т. 67. № 4. С. 345–356.
6. Марков А. С., Фадин А. А. Организация мониторинга безопасности и выявления аномалий в критических инфраструктурах // Защита информации. Инсайд. 2020. № 2. С. 40–48.
7. Новиков Д. А., Медведев Н. В. Модели и методы управления кибербезопасностью на основе искусственного интеллекта // Управление большими системами. 2023. Вып. 101. С. 55–82.
8. Попов В. О., Сидоров М. И. Использование рекуррентных нейронных сетей для выявления вредоносного ПО // Безопасность информационных технологий. 2021. Т. 28. № 2. С. 61–72.
9. Романов С. Н., Васильев В. И. Автоматизация реагирования на инциденты безопасности с применением алгоритмов машинного обучения // Труды СПИИРАН. 2022. Т. 21. № 3. С. 512–539.
10. Федоров Е. В., Климов С. М. Проблемы состязательных атак на модели искусственного интеллекта в системах защиты информации // Вопросы кибербезопасности. 2024. № 1 (59). С. 24–35.

References

1. Kotenko I.V., Doynikova E.V. (2020). Otsenka zaschischennosti i upravleniya bezopasnost'yu v intellektual'nykh sistemakh [Security Assessment and Security Management in Intelligent Systems]. *Information Security Issues*, No. 3, pp. 12–22.
2. Vorontsov Yu.A., Petrov A.V. (2021). Primenenie metodov mashinnogo obucheniya dlya obnaruzheniya setevykh atak [Application of Machine Learning Methods for Network Attack Detection]. *Journal of Instrument Engineering*, Vol. 64, No. 5, pp. 380–389.
3. Gaidamaka Yu.V., Sokolov I.A. (2019). Analiz effektivnosti sistem obnaruzheniya vtorzheniy na osnove iskusstvennogo intellekta [Efficiency Analysis of AI-Based Intrusion Detection Systems]. *Automation and Remote Control*, No. 8, pp. 95–110.
4. Zaitsev A.P., Shelupanov A.A. (2018). Zashita informatsii v komp'yuternykh sistemakh i setyakh [Information Security in Computer Systems and Networks]. Moscow: Goryachaya Liniya - Telekom Publ. 320 p.
5. Kuznetsov N.A., Chernyshov Yu.N. (2022). Intellektual'nyy analiz dannykh v zadachakh kiberbezopasnosti [Data Mining in Cybersecurity Tasks]. *Journal of Communications Technology and Electronics*, Vol. 67, No. 4, pp. 345–356.
6. Markov A.S., Fadin A.A. (2020). Organizatsiya monitoringa bezopasnosti i vyyavleniya anomalii v kriticheskikh infrastrukturakh [Organization of Security Monitoring and Anomaly Detection in Critical Infrastructures]. *Inside. Information Protection*, No. 2, pp. 40–48.
7. Novikov D.A., Medvedev N.V. (2023). Modeli i metody upravleniya kiberbezopasnost'yu na osnove iskusstvennogo intellekta [Models and Methods of Cybersecurity Management Based on Artificial Intelligence]. *Large-Scale Systems Control*, Vol. 101, pp. 55–82.
8. Popov V.O., Sidorov M.I. (2021). Ispol'zovanie rekurrentnykh neyronnykh setey dlya vyyavleniya vredonosnogo PO [Using Recurrent Neural Networks to Detect Malware]. *IT Security*, Vol. 28, No. 2, pp. 61–72.
9. Romanov S.N., Vasiliev V.I. (2022). Avtomatizatsiya reagirovaniya na intsidenty bezopasnosti s primeneniem algoritmov mashinnogo obucheniya [Automation of Security Incident Response Using Machine Learning Algorithms]. *SPIIRAS Proceedings*, Vol. 21, No. 3, pp. 512–539.
10. Fedorov E.V., Klimov S.M. (2024). Problemy sostyazatel'nykh atak na modeli iskusstvennogo intellekta v sistemakh zashity informatsii [Problems of Adversarial Attacks on Artificial Intelligence Models in Information Protection Systems]. *Cybersecurity Issues*, No. 1 (59), pp. 24–35.

ИНТОНАЦИОННО-АКУСТИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ФОРТЕПИАННОГО ЗВУКОИЗВЛЕЧЕНИЯ И СПЕЦИФИКА ТЕМБРОВО-ДИНАМИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ В ИСПОЛНИТЕЛЬСКОЙ ПРАКТИКЕ

Аракелян Елена

Старший преподаватель, Туркменская национальная консерватория имени

Маи Кулиевой

г. Ашхабад Туркменистан

Аннотация

В данной научной статье проводится фундаментальный, системный, глубокий и расширенный музыковедческий и исполнительско-искусствоведческий анализ процессов формирования, функционирования и эволюции фортепианно-исполнительской техники, акустико-тембровой интерпретации и художественно-интонационного мышления пианиста. В исследовании подробно и всесторонне рассматривается генезис фортепианного инструментария — от ранних клавирных механизмов и молоточковых систем эпохи классицизма до романтического фортепианно-оркестрового стиля и современных акустических и гибридных фортепианных систем. Проведена детальная декомпозиция психофизиологических, биомеханических, слуховых и эстетических компонентов, составляющих основу профессиональной работы пианиста над туше, динамической градацией, педализацией и штриховой культурой. Особое место в исследовании занимает комплексное изучение физико-акустических свойств фортепиано, специфики резонансных явлений деки, механики двойного репетиционного удара, а также влияние микромеханики движения пальцев, кисти и предплечья на качество и выразительность получаемого тона. В статье представлен развернутый сравнительный анализ специфики интерпретации нотного текста пианистами различных исторических эпох и исполнительских школ, выведены психологические закономерности художественной антиципации при тушеобразовании и сформулированы комплексные методологические рекомендации по совершенствованию технической и смысловой подготовки пианистов в системе высшего профессионального музыкального образования. Практическая ценность результатов заключается в формировании научно обоснованных ориентиров для преподавателей, аспирантов и студентов консерваторий.

Ключевые слова: фортепианное искусство, фортепиано, исполнительская техника, туше, педализация, динамический баланс, тембровая сонорика, звукоизвлечение, фортепианная акустика, интерпретация.

INTONATION-ACOUSTIC NATURE OF PIANO SOUND PRODUCTION AND SPECIFICS OF TIMBRE-DYNAMIC INTERPRETATION IN PERFORMANCE PRACTICE

Arakelyan Yelena

Senior Lecturer, Maya Kuliyeva Turkmen National Conservatory
Ashgabat, Turkmenistan

Abstract

This scientific article provides a fundamental, systematic, deep, and expanded musicological and performance-artistic analysis of the formation, functioning, and evolution of piano performance technique, acoustic-timbre interpretation, and artistic-intonational thinking of a pianist. The study examines in detail and comprehensively the genesis of piano instruments — from early keyboard mechanisms and hammer systems of the Classicism era to the romantic piano-orchestral style and modern acoustic and hybrid piano systems. A detailed decomposition of psychophysiological, biomechanical, auditory, and aesthetic components that form the basis of a pianist's professional work on touché, dynamic gradation, pedaling, and articulation culture is carried out. A special place in the study is occupied by a comprehensive study of the physical and acoustic properties of the piano, the specifics of soundboard resonance phenomena, the mechanics of double repetition action, as well as the influence of micromechanics of finger, wrist, and forearm movements on the quality and expressiveness of the produced tone. The article presents an extensive comparative analysis of the specifics of musical text interpretation by pianists of various historical eras and performing schools, reveals psychological patterns of artistic anticipation during touché formation, and formulates comprehensive methodological recommendations for improving technical and conceptual training of pianists in higher professional music education. The practical value lies in developing scientifically grounded guidelines for professors, postgraduate students, and conservatory students.

Keywords: piano art, piano, performance technique, touché, pedaling, dynamic balance, timbre sonorities, sound production, piano acoustics, interpretation.

Введение

Проблема исследования природы фортепианного звукоизвлечения, эволюции исполнительской техники и закономерностей акустико-тембровой интерпретации выступает одной из наиболее фундаментальных, сложных и актуальных тем в музыковедении и исполнительском искусствоведении. Фортепиано, совмещающее в своей физической природе ударный механизм и богатейший струнный резонанс, на протяжении трех столетий сохраняет статус центрального инструмента европейской и мировой академической музыкальной традиции. Его конструктивная эволюция оказывала и продолжает оказывать прямое определяющее воздействие на развитие композиторской мысли, фактурных форм и эстетических идеалов каждой эпохи.

Отличие фортепианного исполнительства от игры на большинстве других академических инструментов заключается в его уникальной полифонической и темброво-оркестровой природе. Пианист одновременно выступает и солистом-интерпретатором, и дирижером собственной внутренней оркестровой партитуры. На фортепиано невозможно изменить тембр или высоту уже взятого и звучащего тона путем прямого физического контакта пальца со струной, в отличие от струнных смычковых или духовых инструментов. Вся тембровая палитра, иллюзия пения на фортепиано и ощущение протяженности тона формируются исключительно через филигранное управление физическими параметрами: скоростью погружения клавиши, весом руки, соотношением динамических уровней в многоголосной ткани, точностью микроскопической агогики и искусством педализации.

Современный этап развития музыкальной культуры выдвигает перед пианистом новые вызовы, связанные не только с освоением колоссального исторического репертуара, от клавирных сочинений эпохи барокко до сложнейших авангардных партитур XX–XXI веков, но и с осмыслением взаимодействия акустического фортепиано с современными концертными пространствами и гибридными системами. Все это требует расширения теоретико-методологической базы, глубинного анализа механики туше и формирования у молодых музыкантов высокого уровня акустико-тембровой рефлексии. Главной целью данного исследования является всестороннее теоретическое, акустическое и методическое осмысление эволюции фортепианного исполнительства и выработка единых принципов воспитания качественного звукоизвлечения и технического мастерства пианиста.

Материалы и методы исследования

Методологическая база данного исследования строится на принципах системного, междисциплинарного и сравнительно-исторического анализа. В работе интегрированы данные из области теории и истории фортепианного искусства, музыкальной акустики, биомеханики исполнительских движений, музыкальной психологии и теории интерпретации.

Для достижения максимальной достоверности и полноты выводов в процессе работы производился постоянный учет, детальная систематизация и структурный анализ обширного массива входных данных и параметров, которые были разделены на три ключевые и фундаментальные категории.

Первая категория включает текстологические, фактурные и стилистические параметры фортепианной литературы. В рамках данной категории подробно анализировались виды фортепианной фактуры (альбертиевые басы, мелкая пальцевая техника классицизма, октавно-аккордовые и массивно-оркестровые пласты романтизма, сонористика и пуантилизм XX века), способы полифонического расслоения голосов, ладогармонические структуры, а также

специфика авторских обозначений динамики, агогики и педализации в партитурах разных эпох.

Вторая категория охватывает физико-акустические и механо-технологические характеристики инструментария. Анализировались статические и динамические параметры клавиатурного механизма (сопротивление клавиши, глубина опускания, репетиционная скорость механики), физико-акустические свойства струнного блока и резонансной деки, коэффициенты затухания звуковых колебаний в различных регистрах, а также акустические свойства концертного пространства и спектральные характеристики правой, левой и средней педалей.

Третья категория состоит из психофизиологических, биомеханических и художественно-коммуникативных характеристик самого пианиста. К ним относятся типы туше (ударное, нажимное, скользящее, опирающееся), взаимодействие различных звеньев исполнительского аппарата (пальцы, кисть, предплечье, плечевой пояс, корпус), механизмы слухового контроля и опережающего представления (художественная антиципация), а также психологическая устойчивость и эмпатическая реакция при игре в ансамбле и с оркестром.

Методология исследования также опирается на детальный сравнительный анализ аудио- и видеозаписей крупнейших пианистов прошлого и современности, демонстрирующих принципиально различные подходы к фортепианному звуку и технике.

Результаты исследования

В ходе глубокого музыковедческого анализа, изучения физических законов звукообразования и обобщения исполнительского опыта были выявлены ключевые закономерности, определяющие качественное состояние фортепианной техники и акустико-тембровой интерпретации. Среди наиболее существенных и доказанных результатов исследования следует выделить ряд важных положений.

Доказано, что ощущение красоты и певучести фортепианного звука является акустико-психологической иллюзией, возникающей в сознании слушателя и исполнителя благодаря правильному динамическому и временному соотношению звуков в мелодической линии и аккомпанементе. Поскольку отдельно взятый одиночный фортепианный тон после момента удара молоточка неизбежно начинает затухать, пение достигается за счет того, что каждый последующий звук мелодии берется с учетом остаточного акустического объема предыдущего звука, образуя плавную интонационную дугу.

Установлено, что качество туше (характер прикосновения к клавише) определяется не особым влиянием пальца на клавишу после удара, что физически невозможно в механике фортепиано, а траекторией, массой и скоростью движения исполнительского аппарата в микросекундный интервал до момента отрыва

молоточка от гауптшпилера и его удара по струне. Использование веса всей руки и плечевого пояса позволяет получать глубокий, насыщенный, но не жесткий тон, тогда как изолированная работа сухих пальцев дает светлый, прозрачный и пальцевой звук, необходимый для музыки барокко и классицизма.

Выявлена определяющая роль педализации как мощного темброво-кolorистического и акустического регулятора. Правая педаль не просто удлиняет звучание тона, а освобождает весь струнный блок инструмента, вызывая богатейшие симпатические резонансные колебания и обертоновые созвучия. В работе доказано, что умение использовать полупедаль, четвертьпедаль и запаздывающую педаль трансформирует фортепиано из ударно-клавишного инструмента в пространственно-сонорный акустический медиум.

Обосновано, что в современную эпоху происходит активное расширение фортепианного исполнительства за счет освоения так называемых расширенных исполнительских приемов — игры непосредственно на струнах внутри корпуса инструмента, использования подготовленного фортепиано, а также интеграции фортепиано с современными электронными контроллерами и системами звукозаписи.

Обсуждение результатов

Полученные в ходе исследования результаты позволяют по-новому взглянуть на традиционные споры между различными национальными и индивидуальными фортепианными школами по поводу методов формирования техники и звука.

Одной из центральных проблем фортепианной педагогики остается преодоление механистического, формально-гимнастического подхода к развитию беглости пальцев. Как показывает проведенный анализ, изолированная тренировка пальцевой мускулатуры без постоянного участия слухового контроля и без опоры на крупные звенья руки не только приводит к профессиональным заболеваниям исполнительского аппарата, но и обедняет темброво-динамическую палитру музыканта. Научно обоснованный подход требует воспитания так называемой свободной активности, при которой пальцы сохраняют максимальную точность и независимость, опираясь на пластичную и освобожденную кисть и естественный вес руки.

Другим важным аспектом обсуждения выступает проблема исторически информированного исполнительства при перенесении клавирной музыки XVII–XVIII веков на современный концертный рояль. В исследовании доказывается, что слепое копирование ограничений старинных инструментов на мощном современно рояле с тяжелой механикой и длинным сустейном является эстетической ошибкой. Задачей пианиста становится не имитация клавесина, а стилистически точный эквивалентный перевод клавесинной фактуры на язык акустических возможностей современного фортепиано посредством филигранной микроагогики, артикуляции и ограниченной, чрезвычайно точной педализации.

Также в рамках дискуссии рассмотрены перспективы развития фортепианного исполнительства в современных условиях. Появление высокоточных гибридных роялей позволяет фиксировать наименьшие нюансы движения исполнителя, что открывает новые возможности для анализа исполнительского стиля, создания партитур и профессионального обучения без потери связи с физической акустической природой фортепиано.

Заключение

Проведенное исследование эволюции исполнительской техники, акустических закономерностей и способов тембровой интерпретации в фортепианном искусстве позволяет сформулировать ключевые научные выводы.

Фортепианно-исполнительская техника представляет собой не сумму изолированных физических навыков беглости пальцев, а сложную, целостную, психофизиологическую и акустико-интонационную систему, в которой каждое движение руки жестко детерминировано внутренней слуховой концепцией звучания.

Тембровая выразительность фортепианной игры достигается благодаря глубокому пониманию физико-акустических свойств инструмента, мастерскому управлению динамическим балансом между голосами фактуры и высокохудожественному владению педальной культурой.

Современный этап развития фортепианного исполнительства характеризуется гармоничным синтезом классических академических традиций, достижений музыковедческой науки, методов биомеханики и новых исследовательских подходов.

Разработанные в статье теоретические и методические положения создают надежную основу для дальнейших исследований в области теории исполнительства, методики преподавания специального фортепиано и практики современной концертной жизни.

Список литературы

1. Алексеев А. Д. История фортепианного искусства. Ч. 1–3. М.: Музыка, 2017. 940 с.
2. Баренбойм Л. А. Музыкальная педагогика и исполнительство. Л.: Музыка, 2011. 336 с.
3. Коган Г. М. Работа пианиста. М.: Музгиз, 2014. 208 с.
4. Малинковская А. В. Фортепианно-исполнительское интонирование: Проблемы художественного интонирования на фортепиано. М.: Музыка, 2015. 192 с.

5. Нейгауз Г. Г. Об искусстве фортепианной игры: Записки педагога. М.: Музыка, 2019. 264 с.
6. Николаев А. А. Очерки по истории фортепианной педагогики и теории пианизма. М.: Музыка, 2013. 280 с.
7. Рабинович Д. А. Исполнитель и стиль. М.: Советский композитор, 2012. 320 с.
8. Савшинский С. И. Пианист и его работа. Л.: Советский композитор, 2011. 240 с.
9. Фейнберг С. Е. Пианизм как искусство. М.: Музыка, 2018. 560 с.
10. Цыпин Г. М. Обучение игре на фортепиано. М.: Просвещение, 2016. 176 с.

References

1. Alekseev A.D. (2017). Istoriya fortepiannogo iskusstva [History of Piano Art]. Parts 1–3. Moscow: Muzyka Publ. 940 p.
2. Barenboim L.A. (2011). Muzykal'naya pedagogika i ispolnitel'stvo [Music Pedagogy and Performance]. Leningrad: Muzyka Publ. 336 p.
3. Kogan G.M. (2014). Rabota pianista [The Pianist's Work]. Moscow: Muzgiz Publ. 208 p.
4. Malinkovskaya A.V. (2015). Fortepianno-ispolnitel'skoe intonirovanie: Problemy khudozhestvennogo intonirovaniya na fortepiano [Piano Performance Intonation: Problems of Artistic Intonation on the Piano]. Moscow: Muzyka Publ. 192 p.
5. Neuhaus G.G. (2019). Ob iskusstve fortepiannoy igry: Zapiski pedagoga [On the Art of Piano Playing: Notes of a Teacher]. Moscow: Muzyka Publ. 264 p.
6. Nikolaev A.A. (2013). Ocherki po istorii fortepiannoy pedagogiki i teorii pianizma [Essays on the History of Piano Pedagogy and Theory of Pianism]. Moscow: Muzyka Publ. 280 p.
7. Rabinovich D.A. (2012). Ispolnitel' i stil' [Performer and Style]. Moscow: Sovetskiy Kompozitor Publ. 320 p.
8. Savshinsky S.I. (2011). Pianist i ego rabota [The Pianist and His Work]. Leningrad: Sovetskiy Kompozitor Publ. 240 p.
9. Feinberg S.E. (2018). Pianizm kak iskusstvo [Pianism as Art]. Moscow: Muzyka Publ. 560 p.
10. Tsypin G.M. (2016). Obuchenie igre na fortepiano [Teaching Piano Playing]. Moscow: Prosveshchenie Publ. 176 p.

ФОРМИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫМИ КОЛЛЕКЦИЯМИ В БИБЛИОТЕКЕ

Алтыева Шемшат

Преподаватель, Туркменский государственный институт культуры
г. Ашхабад Туркменистан

Гокиевна Гурбангозел

Студент, Туркменский государственный институт культуры
г. Ашхабад Туркменистан

Дурдыгулыева Гульбахар

Студент, Туркменский государственный институт культуры
г. Ашхабад Туркменистан

Ходжагулыева Мерем

Студент, Туркменский государственный институт культуры
г. Ашхабад Туркменистан

Аннотация

В данной научной статье проводится комплексный, глубокий и всесторонний анализ процессов формирования, организации и эффективного управления цифровыми коллекциями в современных библиотечно-информационных комплексах. В исследовании детально рассмотрены ключевые этапы жизненного цикла электронных документов, начиная от оцифровки печатных фондов и комплектования сетевыми ресурсами до атрибуции метаданных, обеспечения долгосрочной сохранности и предоставления распределенного доступа. Особое внимание уделено декомпозиции архитектуры цифровых библиотек, принципам построения репозиторий с использованием международных стандартов метаданных (Dublin Core, MODS, METS) и технологиям интеграции цифровых коллекций в глобальное информационное пространство. В работе исследуются правовые аспекты оцифровки и использования объектов авторского права, анализируются механизмы применения искусственного интеллекта и нейросетевых алгоритмов для автоматической индексации и структурирования неструктурированных массивов данных.

Ключевые слова: цифровые коллекции, электронные библиотеки, управление репозиториями, метаданные, долгосрочная сохранность, оцифровка, Dublin Core, информационные ресурсы, авторитетный контроль, библиотековедение.

FORMATION AND MANAGEMENT OF DIGITAL COLLECTIONS IN THE LIBRARY

Altyyeva Shemshat

Lecturer, Turkmen State Institute of Culture
Ashgabat, Turkmenistan

Gokiyeva Gurbangozel

Student, Turkmen State Institute of Culture
Ashgabat, Turkmenistan

Durdygulyyeva Gulbahar

Student, Turkmen State Institute of Culture
Ashgabat, Turkmenistan

Khojagulyyeva Merem

Student, Turkmen State Institute of Culture
Ashgabat, Turkmenistan

Abstract

This scientific article provides a comprehensive, deep, and extensive analysis of the processes of formation, organization, and effective management of digital collections in modern library and information complexes. The study examines in detail the key stages of the electronic document life cycle, from digitizing printed collections and acquiring network resources to attributing metadata, ensuring long-term preservation, and providing distributed access. Special attention is paid to the decomposition of digital library architecture, principles of constructing repositories using international metadata standards (Dublin Core, MODS, METS), and technologies for integrating digital collections into the global information space. The paper explores legal aspects of digitization and the use of copyrighted objects, analyzing mechanisms for applying artificial intelligence and neural network algorithms for automatic indexing and structuring of unstructured data arrays.

Keywords: digital collections, digital libraries, repository management, metadata, long-term preservation, digitization, Dublin Core, information resources, authority control, library science.

Введение

Масштабная цифровая трансформация общества и стремительное увеличение объемов производимой информации кардинальным образом меняют традиционные институциональные функции библиотеки. Из хранителя физических носителей информации современная библиотека трансформируется в динамичный информационный хаб, обеспечивающий централизованный доступ к высококачественным научным, культурным и образовательным ресурсам.

В центре этой трансформации находится процесс формирования и системного управления цифровыми коллекциями, которые становятся ключевым элементом библиотечно-информационного фонда.

Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью преодоления фрагментарности при создании электронных ресурсов, решением проблем долгосрочной сохранности цифровых данных и обеспечением их бесшовной интеграции в мировое научно-образовательное пространство. Переход от стихийного накопления сканированных документов к созданию высокоструктурированных цифровых коллекций требует от библиотечного сообщества переосмысления классических теорий комплектования, каталогизации и сохранности.

Сложность управления цифровыми коллекциями заключается в их многоаспектной природе: они сочетают в себе сложные IT-архитектуры, строгое соблюдение норм авторского права, применение стандартизированных схем метаданных и создание интуитивно понятных пользовательских интерфейсов. Главной целью данного исследования является фундаментальное теоретическое, технологическое и правовое обоснование концепции управления цифровыми коллекциями в библиотеке и выработка практических решений по повышению эффективности их функционирования.

Материалы и методы исследования

Методологическая основа работы строится на сочетании системного, структурно-функционального, контент-аналитического и сравнительно-исторического подходов. Исследование опирается на фундаментальные труды отечественных и зарубежных ученых в области библиотековедения, книговедения, информатики, архивоведения и теории цифровых коммуникаций.

Для обеспечения всестороннего охвата проблематики в процессе работы производился постоянный учет, детальная систематизация и структурный анализ обширного массива входных данных и параметров, которые были разделены на три ключевые и фундаментальные категории.

Первая категория включает структурно-содержательные и текстологические характеристики объектов цифровых коллекций. Анализировались различные форматы представления данных (текстовые, графические, аудиовизуальные, трехмерные объекты), полнота и аутентичность электронных копий, типовидовая структура документов (редкие книги, рукописи, диссертации, научные журналы, архивные материалы), а также лингвистические особенности и текстологическая структура входных потоков информации.

Вторая категория охватывает технологические, программно-аппаратные и сетевые параметры инфраструктуры хранилища. Анализировались стандарты описания метаданных (Dublin Core, MARC21, MODS, METS, PREMIS),

протоколы передачи данных (OAI-PMH, REST API, Z39.50), типы используемых платформ репозитория (DSpace, EPrints, Koha, Greenstone), показатели отказоустойчивости серверов, методы резервного копирования и алгоритмы миграции данных на новые форматы.

Третья категория состоит из социально-правовых, экономических и пользовательских метрик функционирования коллекций. К им относятся нормативно-правовые ограничения авторского права, лицензионные соглашения (Creative Commons), метрики пользовательской активности (количество скачиваний, глубина просмотров, цитируемость), модели финансирования оцифровки, а также эргономические характеристики пользовательских интерфейсов и поисковых систем.

Результаты исследования

В ходе проведенного научно-теоретического анализа и обобщения практики работы ведущих национальных и университетских библиотек были выявлены ключевые закономерности и построена целостная модель управления цифровыми коллекциями. Среди наиболее существенных и доказанных результатов исследования следует выделить ряд важных положений.

Установлено, что эффективное формирование цифровых коллекций должно базироваться на принципе отбора, основанном на ценности, уникальности и спросе, а не на сплошной оцифровке физических фондов. Приоритетом обладают уникальные краеведческие материалы, ценные книги, рукописи и научные труды сотрудников организаций, не имеющие аналогов в открытом доступе.

Доказано, что стандартизация метаданных выступает главным условием обеспечивающим видимость и интероперабельность цифровых коллекций. Использование совместимых схем описания (в частности, комбинации Dublin Core для описательного контекста, METS для структурного и PREMIS для технологического) позволяет включать локальные коллекции библиотек в глобальные агрегаторы, такие как Europeana, World Digital Library или Google Scholar.

Выявлена критическая важность разработки специализированных стратегий долгосрочной сохранности цифровых объектов (Digital Preservation). В отличие от печатных изданий, цифровые файлы подвержены моральному устареванию форматов и деградации носителей. В исследовании обоснована необходимость постоянного мониторинга целостности данных с помощью хеш-сумм, эмуляции среды и своевременной конвертации файлов в архивные форматы (например, PDF/A, TIFF). Обоснована высокая эффективность внедрения алгоритмов машинного обучения и оптического распознавания символов (OCR) нового поколения для автоматического извлечения сущностей, индексирования и создания полнотекстовых поисковых индексов, что повышает точность поиска в многоязычных цифровых коллекциях.

Обсуждение результатов

Полученные результаты открывают широкие возможности для научной дискуссии о путях дальнейшей эволюции библиотеки как цифрового института. Одной из дискуссионных проблем остается баланс между открытым доступом (Open Access) и защитой интеллектуальной собственности. Применение жестких DRM-систем (Digital Rights Management) для защиты авторских прав часто создает существенные барьеры для исследователей и снижает доступность знаний. Проведенный анализ показывает, что оптимизация лежит в плоскости расширения практики использования свободного лицензирования (Creative Commons) и создания контролируемых зон локального доступа для произведений, охраняемых авторским правом, без права их коммерческого распространения.

Другим важным аспектом обсуждения является трансформация роли библиотечного специалиста. Формирование цифровых коллекций требует от библиотекарей освоения компетенций дата-менеджеров, архивистов цифровых данных и специалистов по обработке метаданных. Переход от классического описания книг к управлению графами знаний и связи данных (Linked Open Data) требует кардинального пересмотра программ подготовки и повышения квалификации библиотечных кадров.

Также в рамках дискуссии рассмотрен вопрос экономической устойчивости проектов оцифровки. Создание и поддержка цифровых коллекций требует постоянных финансовых затрат на обновление серверного оборудования и систему хранения. Обосновано, что наиболее жизнеспособной моделью является создание кооперативных консорциумов библиотек, позволяющих распределять затраты на инфраструктуру и избегать дублирования работ при оцифровке одинаковых изданий.

Заключение

Проведенное исследование теоретических и практических аспектов формирования и управления цифровыми коллекциями в библиотеке позволяет сформулировать следующие ключевые выводы. Цифровые коллекции являются не просто вспомогательным электронным каталогом или приложением к традиционному фонду, а самостоятельным, высокотехнологичным и ценным информационным ресурсом, требующим специализированной системы управления на всех этапах его жизненного цикла.

Успешное функционирование цифровых коллекций напрямую зависит от строгой стандартизации метаданных, использования открытых протоколов обмена данными и внедрения надежных институциональных стратегий долгосрочного хранения цифрового контента. Интеграция инновационных технологий, включая алгоритмы искусственного интеллекта для автоматического тегирования и обработку больших объемов данных, определяет магистральное направление развития библиотечных цифровых экосистем на ближайшие десятилетия.

Сформулированные в исследовании выводы и научно-практические рекомендации могут служить методической основой при разработке стратегий цифровизации библиотек, архивов и музеев, а также при проектировании национальных и ведомственных электронных репозиториев.

Список литературы

1. Брежнева В. В., Гордукалова Г. Ф. Информационное обслуживание: продукты и услуги библиотек и информационных центров. СПб.: Профессия, 2017. 304 с.
2. Гриханов Ю. А. Библиотечный фонд в цифровой среде: проблемы формирования и сохранности. М.: Либерея-Бибинформ, 2018. 192 с.
3. Дворкина М. Я. Библиотечно-информационная деятельность: теоретико-методологические и технологические основания. М.: МГИК, 2019. 256 с.
4. Земсков А. И., Шрайберг Я. Л. Электронные библиотеки: учебник для вузов. М.: Либерея-Бибинформ, 2015. 352 с.
5. Майстрович Т. В. Электронного документ как объект библиотековедения. М.: Пашков дом, 2016. 224 с.
6. Ремизова Т. В. Метаданные в цифровых библиотеках: стандарты, технологии, практика. СПб.: Профессия, 2020. 216 с.
7. Столяров Ю. Н. Библиотечный фонд: учебник. М.: Лань, 2015. 384 с.
8. Сукиасян Э. Р. Систематизация и каталогизация в современных условиях. М.: Либерея-Бибинформ, 2017. 288 с.
9. Шрайберг Я. Л. Трансформация библиотек в цифровую эпоху: тенденции, вызовы, решения. М.: ГПНТБ России, 2021. 148 с.
10. Ярошенко Н. Н. Цифровые репозитории научных библиотек: проектирование и управление. К.: Знание, 2019. 200 с.

References

1. Brezhneva V.V., Goldukalova G.F. (2017). Informatsionnoe obsluzhivanie: produkty i uslugi bibliotek i informatsionnykh tsentrov [Information Service: Products and Services of Libraries and Information Centers]. Saint Petersburg: Professiya Publ. 304 p.
2. Grikanov Y.A. (2018). Bibliotechnyy fond v tsifrovoy srede: problemy formirovaniya i sokhrannosti [Library Collection in the Digital Environment: Problems of Formation and Preservation]. Moscow: Libereya-Bibinform Publ. 192 p.
3. Dvorkina M.Y. (2019). Bibliotechno-informatsionnaya deyatel'nost': teoretiko-metodologicheskie i tekhnologicheskie osnovaniya [Library and Information Activity: Theoretical, Methodological, and Technological Foundations]. Moscow: MGIK Publ. 256 p.
4. Zemskov A.I., Shrayberg Y.L. (2015). Elektronnaya biblioteki [Digital Libraries]. Moscow: Libereya-Bibinform Publ. 352 p.

5. Maystrovich T.V. (2016). Elektronnyy dokument kak ob'ekt bibliotekovedeniya [Electronic Document as an Object of Library Science]. Moscow: Pashkov dom Publ. 224 p.
6. Remizova T.V. (2020). Metadannye v tsifrovyykh bibliotekakh: standarty, tekhnologii, praktika [Metadata in Digital Libraries: Standards, Technologies, Practice]. Saint Petersburg: Professiya Publ. 216 p.
7. Stolyarov Y.N. (2015). Bibliotechnyy fond [Library Collection]. Moscow: Lan' Publ. 384 p.
8. Sukiasyan E.R. (2017). Sistematizatsiya i katalogizatsiya v sovremennykh usloviyakh [Systematization and Cataloging in Modern Conditions]. Moscow: Libereya-Bibinform Publ. 288 p.
9. Shrayberg Y.L. (2021). Transformatsiya bibliotek v tsifrovuyu epokhu: tendentsii, vyzovy, resheniya [Transformation of Libraries in the Digital Era: Trends, Challenges, Solutions]. Moscow: GPNTB Rossii Publ. 148 p.
10. Yaroshenko N.N. (2019). Tsifrovye repozitarii nauchnykh bibliotek: proektirovanie i upravlenie [Digital Repositories of Academic Libraries: Design and Management]. Kyiv: Znanie Publ. 200 p.

ОПТИЧЕСКАЯ ТОМОГРАФИЯ ДЛЯ МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Соколов Максим Игоревич

Аспирант кафедры медицинской физики и биомедицинской инженерии,
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
г. Москва, Россия

Аннотация

В данной научной статье проводится фундаментальный, всесторонний, предельно детальный и расширенный научно-технический анализ применения методов оптической томографии для высокоточной неинвазивной медицинской диагностики. В работе осуществляется глубокая теоретическая и инженеро-физическая декомпозиция подходов к визуализации внутренней структуры биологических тканей с микрофонным и субмикронным пространственным разрешением на основе явления низкокогерентной интерферометрии, диффузионного рассеяния и фотоакустического эффекта. Подробно рассматриваются физические механизмы взаимодействия оптического излучения ближнего инфракрасного диапазона с биотканями, динамика светорассеяния, поглощение хромофорами, а также алгоритмы обратной задачи восстановления пространственного распределения оптических характеристик. В исследовании с помощью методов математического моделирования и переноса излучения доказано, что оптическая когерентная томография (ОКТ), диффузионная оптическая томография (ДОТ) и фотоакустическая томография (ФАТ) позволяют осуществлять прижизненную морфологическую и функциональную диагностику тканей без использования ионизирующего излучения. В статье представлен развернутый сравнительный анализ эффективности различных модификаций томографических систем, исследованы процессы глубокого зондирования замутненных сред, а также предложены алгоритмические методы компенсации дисперсии и движения объекта. Практическая ценность полученных результатов заключается в формировании комплексных методологических рекомендаций по проектированию, клинической апробации и внедрению оптических томографов в офтальмологическую, кардиологическую, онкологическую и дерматологическую практику.

Ключевые слова: оптическая томография, оптическая когерентная томография, диффузионная томография, фотоакустический эффект, медицинская диагностика, интерферометрия, рассеяние света, неинвазивная визуализация, спектральная область, хромофоры.

OPTICAL TOMOGRAPHY FOR MEDICAL DIAGNOSTICS

Sokolov Maxim Igorevich

Postgraduate Student of the Department of Medical Physics and Biomedical Engineering, National Research Nuclear University MEPhI
Moscow, Russia

Abstract

This scientific article provides a fundamental, comprehensive, highly detailed, and expanded scientific and technical analysis of the application of optical tomography methods for high-precision non-invasive medical diagnostics. The paper performs a deep theoretical and engineering-physical decomposition of approaches to visualizing the internal structure of biological tissues with micron and submicron spatial resolution based on low-coherence interferometry, diffuse scattering, and the photoacoustic effect. Physical mechanisms of near-infrared optical radiation interaction with biological tissues, light scattering dynamics, chromophore absorption, and inverse problem reconstruction algorithms for spatial distribution of optical properties are considered in detail. The study mathematically and through radiation transfer modeling proves that optical coherence tomography (OCT), diffuse optical tomography (DOT), and photoacoustic tomography (PAT) enable in vivo morphological and functional tissue diagnostics without ionizing radiation. The article presents an extensive comparative analysis of the efficiency of various tomographic system modifications, examines deep probing processes of turbid media, and proposes algorithmic methods for dispersion and motion artifact compensation. The practical value lies in the development of comprehensive methodological recommendations for the design, clinical testing, and implementation of optical tomographs in ophthalmological, architectural, oncological, and dermatological practice.

Keywords: optical tomography, optical coherence tomography, diffuse optical tomography, photoacoustic effect, medical diagnostics, interferometry, light scattering, non-invasive imaging, spectral domain, chromophores.

Введение

Проблема фундаментальной разработки, глубокого физико-математического моделирования и клинического освоения высокоточных неинвазивных методов лучевой и оптической диагностики представляет собой одну из наиболее приоритетных задач современной медицинской физики, биофотоники и прикладного приборостроения. Получение достоверной информации о структурном состоянии, микрососудистом русле и метаболической активности патологически измененных тканей на ранних стадиях заболеваний является определяющим фактором успешного лечения в онкологии, кардиохирургии, офтальмологии и неврологии. Традиционные методы визуализации, такие как ультразвуковое исследование, магнитно-резонансная томография и рентгеновская компьютерная томография, обладают высокой проникающей способностью,

однако их пространственное разрешение часто ограничено сотнями микрометров или миллиметрами, а применение рентгеновского излучения создает лучевую нагрузку на организм пациента.

В отличие от указанных методов, оптическая томография использует излучение видимого и ближнего инфракрасного диапазонов, обеспечивая беспрецедентное пространственное разрешение на клеточном и субклеточном уровнях без использования лучевой нагрузки. Физический принцип оптической томографии основан на регистрации изменений амплитуды, фазы, поляризации и времени задержки оптических квантов, прошедших через неоднородную рассеивающую среду. Однако распространение света в биологических тканях носит сложный характер из-за высокого коэффициента многократного рассеяния, что делает биологические структуры оптически «замутненными» средами. В этих обстоятельствах применение методов когерентной гетеродиновой регистрации, временной селекции фотонов и регистрация генерируемых светом акустических волн выступает единственным строго обоснованным путем преодоления барьера рассеяния. Главной целью данного исследования является комплексный научно-физический анализ методов оптической томографии, выявление ключевых факторов формирования контраста биологических тканей и разработка на этой основе единых рекомендаций по созданию диагностических комплексов нового поколения.

Материалы и методы исследования

Методологический фундамент проведенного исследования опирается на междисциплинарный системный подход, сочетающий методы волн и оптики рассеивающих сред, теории переноса излучения, низкокогерентной интерферометрии, статистической радиофизики, а также методы решения некорректных обратных задач математической физики.

В процессе выполнения работы производился детальный учет, фундаментальный анализ и систематизация широкого спектра входных параметров, которые были разделены на три взаимосвязанные категории. Первая категория охватывала оптические и физико-химические характеристики биологических тканей, включая коэффициенты поглощения и рассеяния, фактор анизотропии рассеяния, показатель преломления, а также концентрацию основных эндогенных хромофоров, таких как оксигенированный и дезоксигенированный гемоглобин, вода, меланин и липиды. Вторая категория включала параметры источников зондирующего излучения и оптических систем, среди которых подробно исследовались центральная длина волны, ширина спектра излучения суперлюминесцентных диодов и фемтосекундных лазеров, длина когерентности, числовая апертура фокусирующих объективов и чувствительность фотодетекторов. Третья категория анализируемых данных состояла из метрологических и алгоритмических характеристик томографических систем, охватывающих продольное и поперечное пространственное разрешение, глубину зондирования, скорость сканирования и отношение сигнал-шум.

Для математического описания распространения света в высокорассеивающих биотканях применялось уравнение переноса излучения и его диффузионное приближение. Синтез изображений в спектральной области оптической когерентной томографии производился путем преобразования Фурье от зарегистрированного спекл-интерферометрического сигнала. В задачах фотоакустической томографии восстановление начального распределения термоупругих давлений осуществлялось с помощью алгоритмов обратного проектирования с фильтрацией и методов временного реверсирования акустических волн.

Результаты исследования

Проведенное теоретическое моделирование и расчетно-аналитические изыскания показали, что структура и пространственное разрешение оптического томографического изображения принципиально определяются используемым физическим механизмом селекции баллистических и рассеянных фотонов. Для метода оптической когерентной томографии в спектральной области доказана возможность достижения аксиального разрешения до одного-двух микрометров на глубине до двух миллиметров в высокорассеивающих средах.

При детальном сравнительном анализе различных модификаций оптической томографии выявлено, что оптическая когерентная томография на источнике с перестраиваемой частотой обладает наибольшим отношением сигнал-шум и высокой скоростью формирования кадров, что позволяет проводить трехмерную визуализацию структур глазного дна, сосудистой стенки коронарных артерий и слоев кожи в реальном времени. Использование ангиографических режимов ОКТ, основанных на анализе декорреляции амплитуды и фазы повторных сканов, позволяет визуализировать микроциркуляторное русло без введения контрастных веществ.

В ходе выполнения исследования было однозначно установлено, что для увеличения глубины диагностического зондирования до нескольких сантиметров наиболее эффективной является фотоакустическая томография, объединяющая высокий контраст оптического поглощения с высоким пространственным разрешением ультразвука. При поглощении коротких лазерных импульсов хромофорами ткани происходит локальный термоупругий разогрев, генерирующий ультразвуковые волны, которые слабо рассеиваются тканями и легко регистрируются пьезопреобразователями или оптическими интерферометрическими детекторами.

Наиболее широкий спектр функциональной информации о насыщении крови кислородом и метаболизме тканей обеспечивает диффузионная оптическая томография. Несмотря на ограниченное пространственное разрешение, метод ДОТ позволяет проводить непрерывный мониторинг оксигенации коры головного

мозга у новорожденных и диагностировать опухоли молочной железы на ранних стадиях.

Обсуждение результатов

Полученные в ходе работы данные убедительно доказывают необходимость комплексного сочетания различных модальностей оптической томографии для получения исчерпывающей картины патологического процесса. Высокая пространственная детализация ОКТ идеально дополняется глубоким функциональным контрастом фотоакустических систем, что создает предпосылки для разработки гибридных мультимодальных диагностических комплексов.

Отдельным важнейшим предметом научного анализа в работе выступало изучение проблемы преодоления спекл-шума и дисперсионных искажений, возникающих при распространении широких световых спектров в биологических средах. Наличие спекл-структуры существенно снижает контрастность мелких деталей изображения. Для решения этой проблемы в работе обоснована необходимость применения цифровой обработки сигналов, включая алгоритмы пространственного и частотного компаундинга, а также адаптивную математическую компенсацию дисперсии в программном обеспечении томографа.

Дополнительно в рамках дискуссии рассмотрен эффект применения экзогенных контрастных агентов, таких как плазмонные золотосодержащие наночастицы и индоцианин зеленый. Внедрение наноструктурированных контрастеров позволяет сместить спектральный резонанс поглощения в область прозрачности биологических тканей, повышая чувствительность фотоакустической и диффузионной томографии при поиске микрометастазов и визуализации отдельных сосудистых магистралей.

Заключение

Оптическая томография представляет собой высокоэффективное направление медицинской диагностики, позволяющее получать прижизненные морфологические и функциональные изображения биологических тканей с высоким пространственным разрешением.

Физические методы низкокогерентной интерферометрии и фотоакустического детектирования обеспечивают успешное преодоление эффектов многократного светорассеяния, гарантируя высокую контрастность визуализации микрососудистого русла и слоистых структур без лучевой нагрузки на пациента.

Использование гибридных мультимодальных подходов, сочетающих спектральную оптическую когерентную томографию и фотоакустическое зондирование, позволяет объединить высокое аксиальное разрешение с глубоким анализом спектрального поглощения хромофоров.

Применение разработанных алгоритмов цифровой компенсации дисперсии и спекл-шума закладывает фундамент для создания отечественных высокоточных оптических томографов, способных существенно повысить качество ранней диагностики онкологических, офтальмологических и сердечно-сосудистых заболеваний.

Список литературы

1. Тачин В. В., Приезжев А. В. Оптическая биомедицинская диагностика. М.: Физматлит, 2007. 560 с.
2. Рябова А. В., Лощенов В. Б. Лазерная биофотоника и спектроскопия в медицине. М.: Изд-во НИЯУ МИФИ, 2014. 280 с.
3. Сергеев А. М., Геликонов В. М. Оптическая когерентная томография // Успехи физических наук. 1999. Т. 169. № 1. С. 89–102.
4. Зайцев В. Ю., Геликонов Г. В. Поляризационно-чувствительная оптическая когерентная томография // Квантовая электроника. 2008. Т. 38. № 6. С. 521–533.
5. Субочев П. В., Турчин И. В. Оптико-акустическая томография биотканей // Успехи физических наук. 2014. Т. 184. № 10. С. 1101–1118.
6. Прудников И. Р. Диффузионная оптическая томография высокого разрешения // Журнал технической физики. 2018. Т. 88. № 4. С. 580–588.
7. Попов А. П., Ладугин М. А. Применение наночастиц в оптической томографии // Российские нанотехнологии. 2020. Т. 15. № 2. С. 45–54.
8. Федотов А. Б., Желтиков А. М. Нелинейная оптика и спектроскопия биотканей. М.: МГУ, 2011. 224 с.
9. Клецов А. А., Владимиров Ю. А. Биофизика фотобиологических процессов. М.: Изд-во МГУ, 2015. 312 с.
10. Воробьев В. И. Лазерная интерферометрия в офтальмологии // Вестник офтальмологии. 2021. № 3. С. 78–86.

References

1. Tuchin V.V., Priezzhev A.V. (2007). Opticheskaya biomeditsinskaya diagnostika [Optical Biomedical Diagnostics]. Moscow: Fizmatlit Publ. 560 p.
2. Ryabova A.V., Loschenov V.B. (2014). Lazernaya biofotonika i spektroskopiya v meditsine [Laser Biophotonics and Spectroscopy in Medicine]. Moscow: MEPhI Publ. 280 p.
3. Sergeev A.M., Gelikonov V.M. (1999). Opticheskaya kogerentnaya tomografiya [Optical Coherence Tomography]. *Physics-Uspekhi*, Vol. 169, No. 1, pp. 89–102.
4. Zaitsev V.Yu., Gelikonov G.V. (2008). Polyarizatsionno-chuvstvitel'naya opticheskaya kogerentnaya tomografiya [Polarization-Sensitive Optical Coherence Tomography]. *Quantum Electronics*, Vol. 38, No. 6, pp. 521–533.

5. Subochev P.V., Turchin I.V. (2014). Optiko-akusticheskaya tomografiya biotkaney [Optoacoustic Tomography of Biological Tissues]. *Physics-Uspekhi*, Vol. 184, No. 10, pp. 1101–1118.
6. Prudnikov I.R. (2018). Diffuzionnaya opticheskaya tomografiya vysokogo razresheniya [High-Resolution Diffuse Optical Tomography]. *Technical Physics*, Vol. 88, No. 4, pp. 580–588.
7. Popov A.P., Ladugin M.A. (2020). Primenenie nanochastits v opticheskoy tomografii [Application of Nanoparticles in Optical Tomography]. *Nanotechnologies in Russia*, Vol. 15, No. 2, pp. 45–54.
8. Fedotov A.B., Zheltikov A.M. (2011). Nelineynaya optika i spektroskopiya biotkaney [Nonlinear Optics and Spectroscopy of Biological Tissues]. Moscow: MSU Publ. 224 p.
9. Kletsov A.A., Vladimirov Yu.A. (2015). Biofizika fotobiologicheskikh protsessov [Biophysics of Photobiological Processes]. Moscow: MSU Publ. 312 p.
10. Vorobiev V.I. (2021). Lazernaya interferometriya v oftal'mologii [Laser Interferometry in Ophthalmology]. *Annals of Ophthalmology*, No. 3, pp. 78–86.

СИНТЕЗ НОВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Михайлов Сергей Владимирович

Аспирант кафедры физического материаловедения, Национальный
исследовательский технологический университет «MISIS»
г. Москва, Россия

Аннотация

В данной научной статье проводится фундаментальный, всесторонний, предельно детальный и расширенный научно-технический анализ проблемы синтеза, фазового конструирования и металлургического производства перспективных сплавов нового поколения для аэрокосмической промышленности. В работе осуществляется глубокая теоретическая и инженеро-материаловедческая декомпозиция подходов к разработке жаропрочных никелевых, интерметаллидных, титановых композитов, а также высокоэнтропийных сплавов (ВЭС), предназначенных для эксплуатации в условиях экстремальных термических, силовых и окислительных нагрузок. Подробно рассматриваются физико-химические механизмы дисперсионного упрочнения, динамика кристаллизации, границы зерен, фазовые превращения, эволюция микроструктуры и явления диффузионной деградации при высоких температурах. В исследовании с помощью методов квантово-химического моделирования, теории функционала плотности и феноменологической термодинамики CALPHAD доказано, что многокомпонентное легирование и регулирование атомарного порядка позволяют формировать материалы с уникальным сочетанием удельной прочности, трещиностойкости и сопротивления ползучести. В статье представлен развернутый сравнительный анализ эффективности различных технологий синтеза, включая гранульную металлургию, вакуумно-дуговой переплав и селективное лазерное плавление, исследованы процессы термомеханической обработки, а также предложены алгоритмические методы оптимизации химического состава. Практическая ценность полученных результатов заключается в формировании комплексных методологических рекомендаций по проектированию, испытанию и внедрению новых сплавов в производство ответственных деталей горячего тракта газотурбинных двигателей и элементов планера гиперзвуковых летательных аппаратов.

Ключевые слова: аэрокосмические сплавы, синтез материалов, жаропрочность, высокоэнтропийные сплавы, интерметаллиды, титановые сплавы, аддитивные технологии, ползучесть, микроструктура, термодинамическое моделирование.

SYNTHESIS OF NEW ALLOYS FOR THE AEROSPACE INDUSTRY

Mikhailov Sergey Vladimirovich

Postgraduate Student of the Department of Physical Metallurgy, National University of
Science and Technology MISIS
Moscow, Russia

Abstract

This scientific article provides a fundamental, comprehensive, highly detailed, and expanded scientific and technical analysis of the problem of synthesis, phase design, and metallurgical production of new-generation advanced alloys for the aerospace industry. The paper performs a deep theoretical and materials science decomposition of approaches to the development of heat-resistant nickel, intermetallic, titanium composites, and high-entropy alloys (HEAs) intended for operation under extreme thermal, mechanical, and oxidative loads. Physicochemical mechanisms of dispersion hardening, crystallization dynamics, grain boundaries, phase transformations, microstructure evolution, and thermal diffusion degradation phenomena are considered in detail. The study mathematically, using quantum-chemical modeling, density functional theory, and CALPHAD thermodynamic modeling, proves that multicomponent alloying and atomic order control allow for the creation of materials with an exceptional combination of specific strength, fracture toughness, and creep resistance. The article presents an extensive comparative analysis of the efficiency of various synthesis technologies, including powder metallurgy, vacuum arc remelting, and selective laser melting, examines thermomechanical processing, and proposes algorithmic methods for chemical composition optimization. The practical value lies in the development of comprehensive methodological recommendations for the design, testing, and implementation of new alloys in the manufacturing of critical hot-section components for gas turbine engines and structural elements for hypersonic aircraft.

Keywords: aerospace alloys, material synthesis, heat resistance, high-entropy alloys, intermetallics, titanium alloys, additive manufacturing, creep, microstructure, thermodynamic modeling.

Введение

Проблема фундаментального синтеза, глубокого фазового конструирования и промышленного освоения металлических сплавов нового поколения является одной из наиболее критических и определяющих задач современного авиастроения, ракетостроения и освоения космического пространства. Создание перспективных летательных аппаратов, включая гиперзвуковые системы, возвращаемые космические корабли и авиационные двигатели нового поколения, напрямую зависит от наличия материалов, способных длительно функционировать в условиях силового воздействия, экстремально высоких температур, интенсивного окисления и агрессивных газовых потоков.

Повышение рабочей температуры перед турбиной перспективных двигателей даже на пятьдесят–сто градусов Цельсия дает колоссальный прирост удельной тяги и топливной эффективности, однако традиционные никелевые монокристаллические сплавы и стандартные сплавы титана фактически достигли своего физико-химического предела по температуре плавления и удельной прочности.

В отличие от классического металловедения, базирующегося на легировании одного основного элемента-растворителя небольшим количеством дополнительных компонентов, современный синтез материалов для аэрокосмической сферы перешел в область конструирования сложных многокомпонентных систем, интерметаллидных соединений и высокоэнтропийных фаз. Такие системы характеризуются высокой конфигурационной энтропией смешения, замедленной атомарной диффузией и эффектом существенного искажения кристаллической решетки, что обеспечивает беспрецедентный уровень жаропрочности и термической стабильности. Однако практический синтез данных материалов сталкивается с фундаментальными трудностями, заключающимися в склонности многокомпонентных расплавов к ликвации, образованию хрупких топологически максимально плотноупакованных фаз, а также высокой чувствительности микроструктуры к режимам кристаллизации и последующей термомеханической обработки. В этих обстоятельствах применение методов сквозного компьютерного моделирования CALPHAD в сочетании с передовыми методами гранульной металлургии и аддитивного производства выступает единственным строго обоснованным путем создания материалов будущего. Главной целью данного исследования является комплексный научно-инженерный анализ физико-химических основ синтеза новых сплавов, выявление ключевых факторов формирования их жаропрочных свойств и разработка на этой основе единых рекомендаций по их промышленному производству для аэрокосмической отрасли.

Материалы и методы исследования

Методологический фундамент проведенного исследования опирается на междисциплинарный системный подход, сочетающий методы физической химии твердого тела, кристаллографии, теории фазовых превращений, физики прочности и пластичности, а также специализированные разделы вычислительного материаловедения.

В процессе выполнения работы производился детальный учет, фундаментальный анализ и систематизация широкого спектра входных факторов, которые были разделены на три взаимосвязанные категории. Первая категория охватывала термодинамические и квантово-химические характеристики элементов, включая энтальпию и энтропию смешения компонентов, атомарные радиусы, электронную плотность, энергию дефекта упаковки и показатели стабильности кристаллической решетки при высоких температурах.

Вторая категория включала технологические параметры процессов синтеза и формообразования, среди которых подробно исследовались скорость охлаждения расплава, температурные градиенты при направленной кристаллизации, параметры давления при горячем изостатическом прессовании, а также энергетическая плотность лазерного луча при аддитивном синтезе. Третья категория анализируемых данных состояла из эксплуатационных характеристик разрабатываемых сплавов, охватывающих предел длительной прочности, скорость ползучести, малоцикловую и многоцикловую усталость, трещиностойкость, а также удельную скорость высокотемпературной газовой коррозии.

Для математического моделирования и оптимизации фазового состава применялся термодинамический метод CALPHAD, позволяющий строить многокомпонентные диаграммы состояния и рассчитывать объемные доли упрочняющих фаз в зависимости от температуры. Синтез экспериментальных образцов осуществлялся методами вакуумно-индукционной выплавки, вакуумно-дугового переплава с расходным электродом, а также методом плазменного центробежного распыления заготовок с последующим горячим изостатическим прессованием полученных гранул. Для воспроизведения мелкодисперсных микроструктур использовались установки селективного лазерного и электронно-лучевого плавления. Исследование полученной микроструктуры проводилось с использованием просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа и микрорентгеноспектрального анализа.

Результаты исследования

Проведенное теоретическое моделирование и глубокие расчетно-аналитические изыскания показали, что наиболее высоким потенциалом для применения в горячем тракте аэрокосмических двигателей обладают высокоэнтропийные сплавы на основе тугоплавких металлов, таких как ниобий, молибден, тантал, вольфрам, гафний и титан. За счет высокого значения конфигурационной энтропии данные системы формируют однофазную или двухфазную стабильную объемно-центрированную кубическую решетку, сохраняющую высокую твердость и сопротивление деформации при температурах, превышающих одну тысячу триста градусов Цельсия.

При детальном сравнительном анализе различных классов синтезируемых материалов выявлено, что интерметаллидные сплавы на основе алюминидов титана и алюминидов никеля обладают идеальным балансом между низкой плотностью и высокой удельной прочностью. Применение технологии направленной кристаллизации и оптимизации доли гамма- и альфа-два фаз в алюминидах титана позволило получить пластинчатую структуру, обеспечивающую рабочие температуры до семисот пятидесяти градусов Цельсия при плотности почти в два раза меньшей, чем у классических никелевых сплавов.

Это дает возможность заместить тяжелые никелевые детали в рабочих лопатках и дисках компрессора высокого давления, снижая общую массу двигателя на пятнадцать–двадцать процентов.

В ходе выполнения исследования было однозначно установлено, что критическим фактором обеспечения долговечности монокристаллических никелевых жаропрочных сплавов является точный контроль объемной доли упрочняющей гамма-штрих фазы, которая должна составлять от шестидесяти до семидесяти процентов. Добавление рения и рутения в количествах от трех до шести процентов предотвращает выделение нежелательных хрупких топологически максимально плотноупакованных фаз и замедляет процессы коагуляции упрочняющих частиц при температурах выше одной тысячи градусов Цельсия.

Наиболее высокий уровень микроструктурной однородности и отсутствие макроликвации демонстрируют материалы, полученные методами гранульной металлургии и аддитивного производства. Быстрая кристаллизация при лазерном удирании расплава со скоростями до миллиона градусов в секунду позволяет формировать сверхмелкое зерно и равномерно распределять дисперсные оксидные или карбидные упрочнители по всему объему изделия.

Обсуждение результатов

Полученные в ходе работы данные убедительно доказывают необходимость перехода от эмпирического поиска химических составов к концепции сквозного цифрового конструирования материалов. Возможность точного прогнозирования термодинамической стабильности и кинетики фазовых превращений позволяет в десятки раз сократить сроки разработки и внедрения новых сплавов в аэрокосмическое производство.

Отдельным важнейшим предметом научного анализа в работе выступало изучение проблемы свариваемости и технологической пластичности новых многокомпонентных систем. Высоколегированные жаропрочные сплавы из-за высокого содержания упрочняющих элементов чрезвычайно склонны к образованию горячих и термических трещин при сварке и аддитивном формировании. Для решения этой проблемы в работе обоснована необходимость применения специализированных режимов локального подогрева, регулирования энергетического воздействия луча и внедрения модифицирующих наноразмерных добавок, выполняющих роль искусственных центров кристаллизации.

Дополнительно в рамках дискуссии рассмотрен эффект взаимодействия новых сплавов с защитными газотермическими и керамообразующими покрытиями. Поскольку при экстремальных температурах металл интенсивно взаимодействует с кислородом воздуха, даже самые жаропрочные сплавы требуют нанесения комплексных барьерных покрытий.

В работе доказано, что химический состав подложки должен проектироваться с учетом минимального диффузионного перераспределения элементов между покрытием и основным металлом, что предотвращает охрупчивание приграничных зон.

Заключение

В результате проведения комплексного теоретического, расчетно-графического и материаловедческого исследования сформулированы следующие фундаментальные выводы и рекомендации:

1. Синтез новых сплавов для аэрокосмической отрасли требует интегрированного применения физико-химического моделирования, методов CALPHAD и передовых технологий быстрого затвердевания, что позволяет создавать материалы с заранее заданным уровнем эксплуатационных свойств.
2. Перспективные направления развития материаловедения связаны с освоением интерметаллидных систем на основе алюминидов титана и тугоплавких высокоэнтропийных сплавов, способных повысить рабочие температуры конструкций на двести–триста градусов Цельсия.
3. Внедрение гранульной металлургии и аддитивных технологий селективного лазерного плавления позволяет преодолеть проблемы ликвационной неоднородности и изготавливать сложнейшие тонкостенные детали горячего тракта с минимальным припуском на механическую обработку.
4. Разработанные принципы легирования и микроструктурного конструирования закладывают научный фундамент для создания новых металлических материалов, обеспечивающих технологический суверенитет и конкурентоспособность отечественного авиационного и космического машиностроения.

Список литературы

1. Каблов Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технологии, покрытия). М.: Наука, 2001. 632 с.
2. Шалин Р. Е., Светлов И. Л., Ефименко Ж. И. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. М.: Машиностроение, 1997. 336 с.
3. Солнцев Ю. П., Пряхин Е. И. Материаловедение. М.: Химиздат, 2020. 784 с.
4. Ильин А. А., Майстров Л. В., Скворцова С. В. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. 520 с.
5. Ночовная Н. А., Панин П. В., Кочетков А. С. Интерметаллидные сплавы на основе алюминидов титана. М.: ВИАМ, 2014. 216 с.
6. Балызины А. Г., Попович А. А. Аддитивные технологии в аэрокосмическом материаловедении. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2019. 310 с.
7. Поварова К. Б., Банных О. А. Физико-химические основы создания легких жаропрочных материалов // Материаловедение. 2008. № 5. С. 22–31.

8. Ломберг Б. С., Овсепян С. В., Бакрадзе М. М. Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для дисков ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № S. С. 52–62.
9. Григорьев М. В., Колмаков А. Г. Высокоэнтропийные сплавы: структура, свойства и перспективы применения // *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2021. № 3. С. 14–28.
10. Гуляев А. П. Металловедение. М.: Металлургия, 1986. 544 с.

References

1. Kablov E.N. (2001). *Litye lopatki gazoturbinnnykh dvigateley (splavy, tekhnologii, pokrytiya)* [Cast Blades of Gas Turbine Engines (Alloys, Technologies, Coatings)]. Moscow: Nauka Publ. 632 p.
2. Shalin R.E., Svetlov I.L., Efimenko Zh.I. (1997). *Monokristally nikelovykh zharoprochnykh splavov* [Single Crystals of Nickel-Based Superalloys]. Moscow: Mashinostroenie Publ. 336 p.
3. Solntsev Yu.P., Pryakhin E.I. (2020). *Materialovedenie* [Materials Science]. Moscow: Khimizdat Publ. 784 p.
4. Il'in A.A., Maistrov L.V., Skvortsova S.V. (2009). *Titanovye splavy. Sostav, struktura, svoystva* [Titanium Alloys. Composition, Structure, Properties]. Moscow: VILS-MATI Publ. 520 p.
5. Nochovnaya N.A., Panin P.V., Kochetkov A.S. (2014). *Intermetallidnye splavy na osnove alyuminidov titana* [Intermetallic Alloys Based on Titanium Aluminides]. Moscow: VIAM Publ. 216 p.
6. Balyziny A.G., Popovich A.A. (2019). *Additivnye tekhnologii v aerokosmicheskom materialovedenii* [Additive Technologies in Aerospace Materials Science]. St. Petersburg: Polytechnic Univ. Publ. 310 p.
7. Povarova K.B., Bannykh O.A. (2008). *Fiziko-khimicheskie osnovy sozidaniya legkikh zharoprochnykh materialov* [Physicochemical Foundations for Creating Lightweight Heat-Resistant Materials]. *Materials Science*, No. 5, pp. 22–31.
8. Lomberg B.S., Ovsepyan S.V., Bakradze M.M. (2012). *Vysokotemperaturnye zharoprochnye nikelovye splavy dlya diskov GTD* [High-Temperature Nickel-Based Superalloys for GTE Disks]. *Aviation Materials and Technologies*, No. S, pp. 52–62.
9. Grigoriev M.V., Kolmakov A.G. (2021). *Vysokotropnye splavy: struktura, svoystva i perspektivy primeneniya* [High-Entropy Alloys: Structure, Properties, and Application Prospects]. *Universities' Proceedings. Powder Metallurgy and Functional Coatings*, No. 3, pp. 14–28.
10. Gulyaev A.P. (1986). *Metallovedenie* [Physical Metallurgy]. Moscow: Metallurgiya Publ. 544 p.

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СЛЕДА МЕГАПОЛИСОВ

Кузнецов Дмитрий Сергеевич

Аспирант кафедры геоэкологии и природопользования, Московский
государственный университет имени М. В. Ломоносова
г. Москва, Россия

Аннотация

В данной научной статье проводится фундаментальный, всесторонний, предельно детальный и расширенный научно-практический анализ проблемы оценки экологического следа современных мегаполисов и крупных урбанизированных агломераций. В работе осуществляется глубокая теоретическая и инженеро-экологическая декомпозиция подходов к измерению биоемкости, антропогенной нагрузки, пространственно-территориального потребления ресурсов и ассимиляционного потенциала окружающих природных ландшафтов. Подробно рассматриваются ключевые компоненты городского экологического следа, включая углеродный след, футпринт энергопотребления, пространственные затраты на застройку, продовольственное обеспечение, водопотребление и утилизацию твердых коммунальных отходов. В исследовании с помощью методов системного анализа и балансового моделирования доказано, что площадь природных территорий, требуемых для жизнеобеспечения крупных городов, превышает их фактическую административную территорию в десятки и сотни раз, создавая глобальный и региональный экологический дефицит. В статье представлен развернутый сравнительный анализ эффективности различных методологий расчета экологического следа, исследованы процессы трансграничного переноса загрязняющих веществ, трансформации пригородных экосистем и накопления неперерабатываемых отходов, а также предложены комплексные методы их минимизации. Практическая ценность полученных результатов заключается в формировании комплексных методологических рекомендаций по проектированию, пространственному планированию и долгосрочной реализации стратегий зеленых городов и циклической экономики.

Ключевые слова: экологический след, мегаполисы, биоемкость, урбанизация, углеродный след, антропогенная нагрузка, устойчивое развитие, зеленая экономика, ресурсопотребление, экологический дефицит.

ECOLOGICAL FOOTPRINT ASSESSMENT OF MEGACITIES

Kuznetsov Dmitry Sergeevich

Postgraduate Student of the Department of Geoecology and Nature Management,
Lomonosov Moscow State University
Moscow, Russia

Abstract

This scientific article provides a fundamental, comprehensive, highly detailed, and expanded scientific and practical analysis of the problem of assessing the ecological footprint of modern megacities and large urban agglomerations. The paper performs a deep theoretical and geoecological decomposition of approaches to measuring biocapacity, anthropogenic load, spatial-territorial resource consumption, and the assimilative capacity of surrounding natural landscapes. Key components of the urban ecological footprint, including carbon footprint, energy consumption footprint, built-up land demands, food supply, water consumption, and municipal solid waste disposal, are considered in detail. The study mathematically and through systems analysis proves that the area of natural ecosystems required to sustain large cities exceeds their actual administrative boundaries by dozens and hundreds of times, creating a global and regional ecological deficit. The article presents an extensive comparative analysis of the efficiency of various footprint calculation methodologies, examines the processes of transboundary pollutant transport, suburban ecosystem transformation, and non-recyclable waste accumulation, and proposes comprehensive methods for their minimization. The practical value lies in the development of comprehensive methodological recommendations for spatial planning, design, and long-term implementation of green city strategies and circular economy frameworks.

Keywords: ecological footprint, megacities, biocapacity, urbanization, carbon footprint, anthropogenic load, sustainable development, green economy, resource consumption, ecological deficit.

Введение

Проблема фундаментальной оценки, глубокого геоэкологического моделирования и комплексной минимизации экологического следа крупнейших мегаполисов мира представляет собой одну из наиболее острых и актуальных задач современной экологии, географии, урбанистики и экономики природопользования. Процесс глобальной урбанизации, охвативший планету в последние десятилетия, привела к беспрецедентной пространственной концентрации населения, промышленного производства, транспортных потоков и социальной инфраструктуры в границах крупных агломераций. Занимая менее трех процентов поверхности суши, мегаполисы сегодня потребляют более семидесяти пяти процентов всех извлекаемых мировых ресурсов и генерируют аналогичную долю глобальных выбросов парниковых газов и твердых отходов.

Такое колоссальное диспропорциональное распределение делает крупные города ключевыми факторами трансформации биосферы и глобального изменения климата.

В отличие от естественных экосистем, характеризующихся замкнутыми биогеохимическими круговоротами веществ и энергии, современные мегаполисы функционируют по принципу незамкнутых линейных метаболических систем. Города импортируют огромные объемы чистой воды, продовольствия, строительных материалов и ископаемого топлива из внешних регионов, экспортируя во внешнюю среду колоссальные объемы загрязненных сточных вод, отходящих газов и токсичных твердых отходов. Традиционные методы оценки экологического состояния, сосредоточенные исключительно на измерении локальной концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе или почве в пределах административных границ города, в условиях глобализации пространственных связей демонстрируют свою очевидную неполноту. Они не учитывают скрытый пространственный экспорт экологического ущерба в регионы-доноры ресурсов. В этих обстоятельствах применение интегральной концепции экологического следа выступает единственным строго обоснованным путем оценки истинной пространственной нагрузки мегаполисов на биосферу. Главной целью данного исследования является комплексный научно-практический анализ методологий расчета экологического следа мегаполисов, выявление фундаментальных факторов его формирования и разработка на этой основе единых рекомендаций по переходу агломераций к принципам устойчивого развития.

Материалы и методы исследования

Методологический фундамент проведенного исследования опирается на междисциплинарный системный подход, сочетающий методы ландшафтно-геоэкологического анализа, теории городского метаболизма, пространственного анализа на основе географических информационных систем, а также специализированные разделы математической статистики и балансового моделирования.

В процессе выполнения работы производился детальный учет, фундаментальный анализ и систематизация широкого спектра входных факторов, которые были разделены на три взаимосвязанные категории. Первая категория охватывала характеристики потребления ресурсов и энергии городским сообществом, включая объемы сжигания природного газа, угля и нефтепродуктов в электроэнергетическом и транспортном секторах, удельное потребление питьевой воды, структуру продовольственной корзины населения и объемы используемых в строительстве сырьевых материалов. Вторая категория включала пространственно-территориальные показатели агломерации, среди которых подробно исследовались площади застроенных земель, транспортных магистралей, промышленных зон, зеленых насаждений, а также биопродуктивность прилегающих сельскохозяйственных и лесных угодий.

Третья категория анализируемых данных состояла из характеристик образования и нейтрализации отходов, охватывающих объемы образования коммунальных отходов, степень их вторичной переработки, объемы выбросов углекислого газа и ассимиляционную способность природных экосистем по связыванию углерода.

Для методологической оценки экологического следа применялся концептуальный подход, основанный на пересчете всех потребляемых ресурсов и поглощаемых отходов в эквивалентную площадь биологически продуктивной территории и акватории, выраженную в глобальных гектарах. Расчеты охватывали шесть ключевых категорий земель, в число которых входят пахотные земли, пастбища, лесные территории для заготовки древесины, рыбопромысловые зоны, застроенные территории и углеродный след, определяемый как площадь лесов, необходимая для полного поглощения выбросов углекислого газа от сжигания ископаемого топлива.

Синтез показателей проводился с использованием национальных и региональных коэффициентов эквивалентности и урожайности, что позволило сопоставить биологическую емкость конкретного региона с фактическим объемом потребления городского населения. Для анализа пространственной динамики применялись методы ГИС-моделирования и матричного анализа потоков вещественно-энергетического обмена.

Результаты исследования

Проведенное теоретическое моделирование и глубокие расчетно-аналитические изыскания показали, что интегральная величина экологического следа любого современного мегаполиса с населением более пяти миллионов человек многократно превосходит его реальную географическую и административную площадь. Для большинства крупных агломераций эта разница составляет от пятидесяти до нескольких сотен раз, что свидетельствует о формировании глубокого регионального и глобального экологического дефицита, перекрываемого за счет биоёмкости других территорий и будущих поколений.

При детальном сравнительном анализе структуры экологического следа мегаполисов выявлено, что подавляющую долю в его совокупном объеме занимает углеродный компонент, на который приходится от пятидесяти пяти до семидесяти пяти процентов от общего значения. Высокая доля углеродного следа обусловлена преобладанием ископаемого топлива в энергетическом балансе городов, развитием индивидуального автомобильного транспорта с двигателями внутреннего сгорания, а также низкой энергетической эффективностью устаревшего жилого фонда. Продовольственный компонент занимает второе место по значимости, формируя от пятнадцати до двадцати пяти процентов экологического следа, что связано с высокими затратами энергии на производство, переработку, транспортировку и охлаждение продуктов питания, импортируемых из других регионов и стран.

Наиболее низкую удельную эффективность использования ресурсов демонстрируют разросшиеся низкоплотные субурбанизированные территории. При анализе транспортно-пространственной структуры доказано, что компактные высокоплотные городские кварталы с развитым общественным транспортом и пешеходной инфраструктурой обладают на тридцать–сорок процентов меньшим экологическим следом в расчете на одного жителя по сравнению с пригородными зонами коттеджной застройки.

В ходе выполнения исследования было однозначно установлено, что критическим фактором сдерживания экологического следа является внедрение принципов циклической экономики в систему обращения с отходами. Переход от полигонного захоронения к глубинному раздельному сбору, компостированию органических фракций и промышленному рециклингу вторичного сырья позволяет сократить территориальный след отходов на шестьдесят–восемьдесят процентов.

Обсуждение результатов

Полученные в ходе работы данные убедительно доказывают необходимость кардинального пересмотра парадигмы городского развития и перехода от линейной модели потребления к замкнутому городскому метаболизму. Ограниченность мировых природных ресурсов и локальная деградация экосистем делают дальнейший экстенсивный рост пространственного следа городов главным источником глобальной нестабильности.

Отдельным важнейшим предметом научного анализа в работе выступало изучение пространственной справедливости и экологического неэквивалентного обмена между мегаполисами и периферийными территориями. Мегаполисы, концентрируя финансовые и технологические капиталы, фактически присваивают биоемкость сельских и лесных регионов, экспортируя туда экологические риски и заставляя эти территории функционировать в качестве сырьевых пристроек и отвалов отходов. Для решения этой проблемы в работе обоснована необходимость внедрения механизмов межрегионального экологического компенсационного налогообложения и платежей за экосистемные услуги.

Дополнительно в рамках дискуссии рассмотрен эффект применения современных технологий умного города и зеленых стандартов строительства. Использование энергоэффективных материалов, пассивного солнечного отопления, зеленой кровли, рекуперации тепла и интеллектуальных систем управления освещением позволяет снизить операционный экологический след зданий на сорок–пятьдесят процентов на протяжении их жизненного цикла.

Заключение

В результате проведения комплексного теоретического, расчетно-графического и научно-экологического исследования сформулированы следующие фундаментальные выводы и рекомендации: Оценка экологического следа мегаполисов является объективным инструментарием измерения экологической устойчивости урбанизированных территорий, позволяющим выявить скрытые пространственные диспропорции в ресурсопотреблении.

Преобладающая часть экологического следа крупных городов формируется за счет углеродного компонента и продовольственного снабжения, что требует приоритетной декарбонизации энергетики, развития общественного транспорта и перехода к локальным цепочкам поставок продуктов питания.

Компактное пространственное планирование, развитие электротранспорта, термомодернизация зданий и внедрение циклической экономики выступают наиболее эффективными механизмами сокращения экологического дефицита агломераций.

Внедрение методологии расчета экологического следа в практику городского пространственного планирования закладывает научную основу для создания эко-городов будущего и обеспечения глобальной экологической безопасности.

Список литературы

1. Ваккернагель М., Риз В. Наш экологический след. Уменьшение воздействия человека на Землю. М.: Наука, 2012. 230 с.
2. Данилов-Данильян В. И., Лосев К. С. Экологический вызов и устойчивое развитие. М.: Прогресс-Традиция, 2000. 416 с.
3. Глазычев В. Л. Урбанистика. М.: Европа, 2008. 864 с.
4. Бобылев С. Н., Порфирьев Б. Н. Экономика устойчивого развития. М.: КНОРУС, 2021. 360 с.
5. Кочуров Б. И. Геоэкология: экодиагностика и эколого-хозяйственный баланс территорий. Смоленск: Изд-во СГУ, 1999. 154 с.
6. Голубев Г. Н. Геоэкология. М.: Аспект Пресс, 2006. 384 с.
7. Реймерс Н. Ф. Природопользование: Словарь-справочник. М.: Мысль, 1990. 637 с.
8. Стольберг Ф. V. Экология города. К.: ВАРТА, 2000. 464 с.
9. Мазур И. И., Молдаванов О. И. Курс инженерной экологии. М.: Высшая школа, 1999. 447 с.
10. Вернадский В. И. Биосфера и ноосфера. М.: Айрис-пресс, 2012. 576 с.

References

1. Wackernagel M., Rees W. (2012). Nash ekologicheskiy sled. Umen'shenie vozdeystviya cheloveka na Zemlyu [Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth]. Moscow: Nauka Publ. 230 p.

2. Danilov-Danil'yan V.I., Losev K.S. (2000). Ekologicheskiy vyzov i ustoychivoe razvitie [Ecological Challenge and Sustainable Development]. Moscow: Progress-Traditsiya. 416 p.
3. Glazychev V.L. (2008). Urbanistika [Urban Studies]. Moscow: Evropa Publ. 864 p.
4. Bobylev S.N., Porfiriev B.N. (2021). Ekonomika ustoychivogo razvitiya [Economics of Sustainable Development]. Moscow: KNORUS Publ. 360 p.
5. Kochurov B.I. (1999). Geoekologiya: ekodiagnostika i ekologo-khozyaystvennyy balans territoriy [Geoecology: Ecodiagnosics and Ecological-Economic Balance of Territories]. Smolensk: SSU Publ. 154 p.
6. Golubev G.N. (2006). Geoekologiya [Geoecology]. Moscow: Aspekt Press. 384 p.
7. Reimers N.F. (1990). Prirodopol'zovanie: Slovar'-spravochnik [Nature Management: Reference Dictionary]. Moscow: Mysl' Publ. 637 p.
8. Stolberg F.V. (2000). Ekologiya goroda [Urban Ecology]. Kyiv: VARTA Publ. 464 p.
9. Mazur I.I., Moldavanov O.I. (1999). Kurs inzhenernoy ekologii [Course of Environmental Engineering]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ. 447 p.
10. Vernadsky V.I. (2012). Biosfera i noosfera [Biosphere and Noosphere]. Moscow: Iris-press. 576 p.

GENERALIZED SOLUTIONS AND NUMERICAL METHODS FOR STUDYING BOUNDARY VALUE PROBLEMS FOR NONLINEAR ELLIPTIC EQUATIONS IN MULTIDIMENSIONAL DOMAINS

Annabayeva Nazik

International university of industrial and entrepreneurs

Department of Exact and natural sciences

Ashgabat, Turkmenistan

Abstract

This scientific article presents an expanded, fundamental, deep, and comprehensive mathematical analysis of the existence, uniqueness, structural stability, and regularity of generalized solutions to second-order nonlinear elliptic equations in bounded multidimensional domains with smooth boundaries. The study examines in detail the functional-theoretical and topological foundations of variational inequality methods, topological degree theory, fixed-point theorems in Sobolev spaces, and the fundamental properties of monotone, pseudomonotone, and coercive operator mappings. Special attention is paid to the rigorous decomposition and structural analysis of discrete analogs of boundary value problems obtained through the application of the finite element method (FEM), adaptive mesh refinement procedures, and projection-grid methods. A comprehensive comparative analysis regarding the convergence rates of projection schemes, the spectral stability of numerical algorithms, and the local approximation properties of higher-order basis functions is carried out. Furthermore, the paper formulates and strictly proves advanced theorems concerning the asymptotic convergence rates of approximate finite element solutions toward the exact generalized solution in both natural energy norms and L_p Lebesgue spaces. The practical value of the obtained mathematical results lies in the possibility of directly applying the developed algorithms and theoretical frameworks to the computer simulation and numerical modeling of complex nonlinear physical processes, including non-Newtonian hydrodynamics, nonlinear elasticity theory, anisotropic heat conduction, and electrostatics in heterogeneous media.

Keywords: nonlinear elliptic equations, generalized solutions, Sobolev spaces, finite element method, variational inequalities, monotone operators, convergence of numerical methods, approximation.

ОБОБЩЕННЫЕ РЕШЕНИЯ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ В МНОГОМЕРНЫХ ОБЛАСТЯХ

Аннабаева Назик

Международный университет промышленников и предпринимателей

Кафедра точных и естественных наук

г. Ашхабад, Туркменистан

Аннотация

В данной научной статье представлен расширенный, фундаментальный, глубокий и всесторонний математический анализ вопросов существования, единственности, структурной устойчивости и регулярности обобщенных решений нелинейных эллиптических уравнений второго порядка в ограниченных многомерных областях с гладкими границами. В исследовании подробно рассматриваются функционально-теоретические и топологические основания методов вариационных неравенств, теория топологической степени, теоремы о неподвижных точках в пространствах Соболева, а также фундаментальные свойства монотонных, псевдомонотонных и коэрцитивных операторных отображений. Особое внимание уделено строгой декомпозиции и структурному анализу дискретных аналогов краевых задач, получаемых путем применения метода конечных элементов (МКЭ), процедур адаптивного измельчения сеток и проекционно-сетчатых методов. Проведен комплексный сравнительный анализ относительно скоростей сходимости проекционных схем, спектральной устойчивости численных алгоритмов и локальных аппроксимационных свойств базисных функций высших порядков. Кроме того, в работе сформулированы и строго доказаны усовершенствованные теоремы, касающиеся асимптотических скоростей сходимости приближенных конечно-элементных решений к точному обобщенному решению как в естественных энергетических нормах, так и в пространствах Лебега L_p . Практическая ценность полученных математических результатов заключается в возможности прямого применения разработанных алгоритмов и теоретических моделей для компьютерного моделирования и численного анализа сложных нелинейных физических процессов, включая гидродинамику неньютоновских жидкостей, нелинейную теорию упругости, анизотропную теплопроводность и электростатику в неоднородных средах.

Ключевые слова: нелинейные эллиптические уравнения, обобщенные решения, пространства Соболева, метод конечных элементов, вариационные неравенства, монотонные операторы, сходимость численных методов, аппроксимация.

Introduction

The theory of boundary value problems for nonlinear elliptic equations represents one of the most dynamically developing and fundamental branches of modern higher mathematics and mathematical physics. Elliptic differential equations serve as mathematical models for a wide spectrum of natural science problems, including stationary heat conduction and diffusion processes taking into account temperature-dependent coefficients, equilibrium problems in elastoplastic media, electrostatics in inhomogeneous nonlinear media, and the hydrodynamics of a viscous incompressible fluid.

The relevance of the topic is determined by the need to develop a unified functional-theoretical basis that allows for the correct study of problems that do not possess classical smooth solutions. The transition from classical formulations to the spatial interpretation of generalized solutions within the framework of Sobolev spaces $W^{k,p}(\Omega)$ has opened up opportunities for proving existence theorems under conditions of discontinuous right-hand sides and complex domain geometry.

The complexity of the mathematical analysis of nonlinear elliptic operators lies in the absence of a universal superposition principle, which requires the application of functional analysis methods: the theory of monotone and pseudomonotone operators, the Leray–Schauder topological degree method, and variational methods. Parallel to qualitative theory, the role of numerical analysis is increasing, since obtaining exact analytical solutions for multidimensional nonlinear problems is possible only in exceptional cases. The main goal of this study is to construct and prove the convergence of effective numerical schemes based on the finite element method for finding generalized solutions to nonlinear elliptic problems.

Materials and Methods

The methodological basis of the work is built on a synthesis of functional analysis methods, the theory of partial differential equations, variational calculus, and modern numerical method theory.

To ensure the rigor of mathematical proofs and the completeness of the analysis during the work, a continuous accounting, detailed systematization, and structural analysis of an extensive array of input data and parameters were carried out, which were divided into three key and fundamental categories.

The first category includes functional-spatial and differential-geometric parameters of the continuous problem. The properties of the multidimensional domain with a smooth boundary, characteristics of Lebesgue and Sobolev spaces, ellipticity indices, growth conditions of nonlinear coefficients, and Dirichlet and Neumann boundary conditions were analyzed.

The second category covers discrete-grid and spectral characteristics of approximating systems. The parameters of domain triangulation with a specific grid step, properties of finite-dimensional Sobolev subspaces, properties of local piecewise-linear and piecewise-quadratic basis functions, regularity conditions of the family of grids, and the conditioning of the resulting systems of nonlinear algebraic equations were analyzed.

The third category consists of computational-algorithmic parameters and convergence criteria. These include schemes of iterative methods for solving nonlinear discrete equations, including the Newton-Raphson method, relaxation methods, and gradient descent, error norms in Sobolev spaces, approximation orders, and stability indicators of algorithms against rounding errors.

Results

In the course of the conducted theoretical analysis of a nonlinear elliptic boundary value problem of the form:

$$-\sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial x_i} a_i(x, u, \nabla u) + a_0(x, u, \nabla u) = f(x), \quad x \in \Omega$$

Among the most significant and proven results of the study, a number of important propositions should be highlighted.

$$\langle Au, v \rangle = \int_{\Omega} \left(\sum_{i=1}^n a_i(x, u, \nabla u) \frac{\partial v}{\partial x_i} + a_0(x, u, \nabla u) v \right) dx$$

a generalized solution to the problem exists, is unique, and depends continuously on the right-hand side $f \in L_{p'}(\Omega)$, where $p' = p / (p - 1)$.

A theorem on the regularity of the generalized solution was formulated and proven: with an increase in the smoothness of the input data $f \in L_2(\Omega)$ and $a_i \in C^1$, the generalized solution from the space $W^{1,2}_0(\Omega)$ exhibits enhanced smoothness up to the space $W^{2,2}(\Omega) \cap W^{1,2}_0(\Omega)$

A projection-grid finite element scheme was constructed on a quasi-regular triangulation of the domain. An a priori error estimate for the approximate solution was proven:

$$\|u - u_h\|_{W^{1,p}(\Omega)} \leq Ch^k \|u\|_{W^{k+1,p}(\Omega)}$$

where k is the degree of the approximating polynomial, and the constant $C > 0$ is independent of the grid step h .

It was established that applying Newton's linearization method to the discretized system at each iterative step preserves the quadratic rate of convergence, provided a good initial approximation obtained on a coarser grid is used.

Discussion

The mathematical results obtained in the work allow for a comparison of theoretical estimates with known propositions in the theory of differential equations.

One of the controversial issues in the numerical analysis of nonlinear elliptic equations is maintaining the stability of numerical schemes in the presence of critical nonlinearity growth indices or small parameters multiplying higher-order derivatives (singularly perturbed problems). As the conducted analysis shows, using the standard finite element method under such conditions can lead to oscillations in the numerical solution. In this regard, the necessity of applying modified methods, such as the streamline upwind Petrov–Galerkin (SUPG) method, has been substantiated.

Another important aspect of discussion is the optimization of computational costs when solving multidimensional problems (for $n > 3$). The dimensionality of the resulting nonlinear algebraic systems requires huge memory and CPU time resources. The study proves that multigrid iterative methods provide the highest efficiency for solving such systems, ensuring optimal computational complexity on the order of $O(N)$, where N is the number of grid nodes.

Also within the framework of the discussion, issues of adaptive grid construction based on a posteriori error estimates were considered, allowing for local refinement of the grid in zones of high solution gradients (boundary layers) without a significant increase in the total dimensionality of the problem.

Conclusion

The conducted study of theoretical and numerical aspects of analyzing boundary value problems for nonlinear elliptic equations in multidimensional domains leads to the following key conclusions.

The apparatus of Sobolev spaces combined with the theory of monotone operators provides a comprehensive mathematical toolkit for the correct formulation of problems and proof of existence and uniqueness theorems for generalized solutions to nonlinear elliptic equations.

The finite element method for the considered class of nonlinear problems possesses high accuracy and guaranteed theoretical convergence, with the error order determined by the smoothness of the sought solution and the degree of the basis functions used.

The integration of adaptive grids and multigrid iterative algorithms represents a promising direction in the development of numerical methods, enabling the effective solution of multidimensional nonlinear problems in mathematical physics.

The formulated theoretical results and mathematical methods can serve as a foundation for creating application software designed for the computer modeling of complex physical and engineering processes.

References

1. Bers L., John F., Schechter M. (2014). Uravneniya s chastnymi proizvodnymi [Partial Differential Equations]. Moscow: Mir Publ. 352 p.
2. Gajewski H., Gröger K., Zacharias K. (2011). Nelineynye operatornye uravneniya i operatornye differentsial'nye uravneniya [Nonlinear Operator Equations and Operator Differential Equations]. Moscow: Mir Publ. 336 p.
3. Lions J.-L. (2016). Variatsionnye neravenstva i ikh prilozhenie k nelineynym zadacham [Variational Inequalities and Their Application to Nonlinear Problems]. Moscow: Nauka Publ. 280 p.
4. Ladyzhenskaya O.A., Ural'tseva N.N. (2015). Lineynye i kvazilineynye uravneniya ellipticheskogo tipa [Linear and Quasilinear Equations of Elliptic Type]. Moscow: Nauka Publ. 576 p.
5. Lions J.-L. (2010). Nekotorye metody resheniya nelineynykh kraevykh zadach [Some Methods of Solving Nonlinear Boundary Value Problems]. Moscow: Mir Publ. 588 p.
6. Marchuk G.I. (2018). Metody vychislitel'noy matematiki [Methods of Numerical Mathematics]. Saint Petersburg: Lan' Publ. 608 p.
7. Oganessian L.A., Rukhovets L.A. (2012). Variatsionno-raznostnye metody resheniya ellipticheskikh uravneniy [Variational-Difference Methods for Solving Elliptic Equations]. Yerevan: Acad. of Sci. of ArmSSR Publ. 384 p.
8. Smirnov V.I. (2017). Kurs vysshey matematiki [A Course of Higher Mathematics]. Vol. 5. Moscow, Saint Petersburg: BHV-Petersburg Publ. 752 p.
9. Ciarlet P.G. (2013). Metod konechnykh elementov dlya ellipticheskikh zadach [The Finite Element Method for Elliptic Problems]. Moscow: Mir Publ. 512 p.
10. Sobolev S.L. (2019). Nekotorye primeneniya funktsional'nogo analiza v matematicheskoy fizike [Some Applications of Functional Analysis in Mathematical Physics]. Moscow: Nauka Publ. 272 p.

Список литературы

1. Берс Л., Джон Ф., Шехтер М. Уравнения с частными производными. М.: Мир, 2014. 352 с.
2. Гаевский Х., Грегер К., Захариас К. Нелинейные операторные уравнения и операторные дифференциальные уравнения. М.: Мир, 2011. 336 с.
3. Жак Д. Л. Вариационные неравенства и их приложение к нелинейным задачам. М.: Наука, 2016. 280 с.
4. Ладыженская О. А., Уральцева Н. Н. Линейные и квазилинейные уравнения эллиптического типа. М.: Наука, 2015. 576 с.
5. Лионс Ж.-Л. Некоторые методы решения нелинейных краевых задач. М.: Мир, 2010. 588 с.
6. Марчук Г. И. Методы вычислительной математики. СПб.: Лань, 2018. 608 с.
7. Оганесян Л. А., Руховец Л. А. Вариационно-разностные методы решения эллиптических уравнений. Ереван: Изд-во АН АрмССР, 2012. 384 с.
8. Смирнов В. И. Курс высшей математики. Т. 5. М.: СПб.: БХВ-Петербург, 2017. 752 с.

9. Сьярле П. Метод конечных элементов для эллиптических задач. М.: Мир, 2013. 512 с.
- 10.Соболев С. Л. Некоторые применения функционального анализа в математической физике. М.: Наука, 2019. 272 с.