



$$a^2 = b^2 + c^2 \quad f = \frac{dy}{dx} = x^a$$

№1(2)

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

# ГОРИЗОНТЫ

## SCIENCE HORIZONS

# НАУКИ



---

# 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), **Мартirosян 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.

# 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.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОДЛЕДНОГО ОКЕАНА ЭНЦЕЛАДА.....	6
2. ТЕХНОЛОГИИ ТРЕХМЕРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ МОЛЕКУЛЯРНЫХ СТРУКТУР В СОВРЕМЕННЫХ БИОМЕДИЦИНСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ.....	15
3. ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СТРУКТУРНОЙ ЦЕЛОСТНОСТИ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	24
4. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ НА БАЗЕ МНОГОФАЗНЫХ ПЬЕЗОКОМПОЗИТОВ .....	34
5. ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ СТРУКТУРНО-МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МЕМБРАН ДЛЯ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ СИСТЕМ ГЛУБОКОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ И ПИТЬЕВОЙ ВОДОПОДГОТОВКИ .....	44
6. МУЛЬТИДИСЦИПЛИНАРНОЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПСИХОЛОГИЧЕСКИХ ДЕТЕРМИНАНТ И МЕХАНИЗМОВ СОЦИАЛЬНОГО ВЛИЯНИЯ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОЙ ЦИФРОВОЙ КОММУНИКАЦИИ И АЛГОРИТМИЧЕСКИХ СРЕД.....	54
7. КОГНИТИВНО-ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ И СОЦИОКУЛЬТУРНЫЕ ДЕТЕРМИНАНТЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЭТНОСОЦИАЛЬНЫХ СТЕРЕОТИПОВ И ПРЕДРАССУДКОВ В УСЛОВИЯХ ТРАНСФОРМАЦИИ ОБЩЕСТВЕННОГО СОЗНАНИЯ .....	64
8. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТРЕБИТЕЛЬСКОГО ПОВЕДЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПРЕДИКАТИВНОЙ ЭКОНОМИКИ И ГЛОБАЛЬНОЙ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ РЫНКОВ.....	75
9. ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ПРЕЦИЗИОННЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ В УСЛОВИЯХ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ЛАБОРАТОРИЙ.....	83

10. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТРАНСФОРМАЦИИ АКАДЕМИЧЕСКОГО МУЗЫКАЛЬНОГО ИСКУССТВА В СИСТЕМЕ СОВРЕМЕННОГО КОНСЕРВАТОРСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУЧНОЙ КОММУНИКАЦИИ .....	93
--	----

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОДЛЕДНОГО ОКЕАНА ЭНЦЕЛАДА

**Белов Максим Дмитриевич**

*Аспирант кафедры астрономии и космической геодезии физического факультета  
Казанский (Приволжский) федеральный университет  
г. Казань, Россия*

### **Аннотация.**

Подледные океаны ледяных лун гигантов представляют собой одни из самых перспективных объектов для поиска внеземной жизни в Солнечной системе. В данной работе представлены результаты численного моделирования термодинамических условий и химического состава подледного океана Энцелада с учетом последних данных миссии Cassini. Цель исследования – реконструировать физико-химические параметры среды в зоне контакта океана с каменистым ядром и оценить стабильность гидротермальных процессов. Моделирование проводилось с использованием программного комплекса СНИМ-ХРТ, адаптированного для условий низких температур и высоких давлений (до 100 МПа). Рассмотрены три сценария циркуляции флюидов: низкотемпературное просачивание (40°C), умеренная гидротермальная активность (90°C) и высокотемпературные черные курильщики (150°C). Результаты показывают, что при температуре около 90°C и рН в диапазоне 8.5–10.5 формируются оптимальные условия для образования кремнеземистых наночастиц, обнаруженных в кольце Е Сатурна. Установлено, что концентрация растворенного молекулярного водорода в таких условиях достигает 3–5 ммоль/кг, что обеспечивает достаточный энергетический потенциал для метаногенных микробных сообществ. Динамический анализ показал, что конвективные потоки способны поддерживать взвешенное состояние органических молекул в течение  $10^5$  лет. Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных профилей концентраций для интерпретации данных будущих миссий, таких как Enceladus Orbilander, и уточнения моделей обитаемости ледяных миров.

**Ключевые слова:** Энцелад, подледный океан, гидротермальная активность, численное моделирование, биосигнатуры, СНИМ-ХРТ, ледяные луны, обитаемость.

# MODELING OF HYDROTHERMAL CONDITIONS AND CHEMICAL COMPOSITION OF ENCELADUS' SUB-ICE OCEAN

**Belov Maxim Dmitrievich**

*Postgraduate student of the Department of Astronomy and Space Geodesy of the Faculty of Physics Kazan (Volga Region) Federal University  
Kazan, Russia*

## **Abstract.**

The sub-ice oceans of the giant planet icy moons represent some of the most promising objects for searching extraterrestrial life in the Solar System. This paper presents results of numerical modeling of thermodynamic conditions and chemical composition of Enceladus' sub-ice ocean considering the latest Cassini mission data. The aim of the study is to reconstruct physical and chemical parameters of the environment at the contact zone between the ocean and the rocky core and to evaluate the stability of hydrothermal processes. Modeling was performed using the CHIM-XPT software package adapted for low temperatures and high pressures (up to 100 MPa). Three fluid circulation scenarios were considered: low-temperature seepage (40°C), moderate hydrothermal activity (90°C), and high-temperature black smokers (150°C). Results show that at temperatures around 90°C and pH in the range of 8.5–10.5, optimal conditions are formed for the creation of silica nanoparticles found in Saturn's E-ring. It was established that the concentration of dissolved molecular hydrogen under such conditions reaches 3–5 mmol/kg, providing sufficient energy potential for methanogenic microbial communities. Dynamic analysis showed that convective flows are capable of maintaining the suspended state of organic molecules for 10<sup>5</sup> years. The practical significance lies in the possibility of using the obtained concentration profiles for interpreting data from future missions, such as Enceladus Orbilander, and refining habitability models of icy worlds.

**Keywords:** Enceladus, sub-ice ocean, hydrothermal activity, numerical modeling, biosignatures, CHIM-XPT, icy moons, habitability.

## **Введение**

Исследование ледяных спутников планет-гигантов стало одним из центральных направлений современной планетологии после обнаружения признаков наличия жидкой воды под их ледяными панцирями. Среди всех подобных объектов Энцелад, шестой по величине спутник Сатурна, занимает особое место благодаря активному криовулканизму в районе южного полюса. Гейзеры, выбрасывающие струи водяного пара и ледяных частиц в космическое пространство, предоставляют уникальную возможность прямого изучения состава скрытого океана без необходимости бурения многокилометровой ледяной корки.

Данные, полученные масс-спектрометрами миссии Cassini, подтвердили наличие в выбросах не только солей и простых органических соединений, но и сложных макромолекул, а также мелкодисперсного кремнезема. Эти находки указывают на протекание активных процессов взаимодействия в системе «вода–порода» на дне океана. Понимание физико-химических условий, господствующих в этой контактной зоне, необходимо для оценки геохимической энергии, доступной для потенциальных метаболических процессов.

Традиционные модели внутреннего строения Энцелада предполагают наличие пористого каменистого ядра, пропитанного водой, что создает огромную площадь поверхности для химических реакций. Однако прямые измерения параметров этой среды невозможны, что выводит численное моделирование на первый план в качестве основного инструмента исследования. Современные подходы требуют учета сложного равновесия между растворенными газами, минеральными фазами и органическими субстратами в условиях высокого давления.

Несмотря на обилие теоретических работ, вопрос о длительности и стабильности гидротермальных циклов на Энцеладе остается дискуссионным. Неясно, являются ли наблюдаемые гейзеры следствием кратковременных тектонических событий или же они поддерживаются устойчивой конвективной системой в течение геологически значимых периодов времени. Также требует уточнения влияние щелочности среды на растворимость ключевых биогенных элементов.

Цель настоящей работы – провести комплексное моделирование термодинамических и химических условий в подледном океане Энцелада при различных температурных режимах гидротермальной активности. Для достижения цели решаются задачи по воссозданию минерального состава ядра, расчету фазовых равновесий в системе «флюид–порода», анализу концентраций молекулярного водорода как маркера пригодности среды для жизни и оценке динамики переноса вещества от дна к ледяной поверхности.

## **Материалы и методы исследования**

### **1. Физико-химическая модель и программный комплекс**

Для термодинамического моделирования взаимодействия океанической воды с породами ядра использовался программный код СНИМ-ХРТ, основанный на методе минимизации свободной энергии Гиббса. Данный инструмент позволяет вычислять распределение химических элементов между водным раствором, газовой фазой и набором вторичных минералов. В расчетную базу данных были внесены поправки для учета высоких давлений (до 1000 бар) и специфической ионной силы океана Энцелада, которая, по оценкам, составляет около 0.1–0.3 моль/кг.

Основные допущения модели:

Система считается термодинамически закрытой на этапе взаимодействия «вода–порода»;

Давление на дне океана зафиксировано на уровне 80 МПа (соответствует глубине океана 40 км при плотности льда и воды, характерной для Энцелада);

Учитывается кинетика растворения первичных минералов ядра, представленного углистым хондритом типа CI.

## **2. Начальный состав системы**

Состав каменистого ядра моделировался на основе элементного состава хондритов CI, которые считаются наиболее близкими по составу к первичному веществу внешней части Солнечной системы. Основные минералы-мишени: оливин, пироксен, серпентин и сульфиды железа.

Начальный состав океанической воды задавался как слабоминерализованный раствор с преобладанием хлоридов натрия и карбонатов, исходя из данных анализа частиц кольца E. Концентрация общего растворенного углерода составляла 0.01 моль/кг. Соотношение массы воды к массе породы в зоне реакции варьировалось от 1 до 10.

## **3. Сценарии моделирования**

В работе исследованы три температурных режима, которые могут существовать в недрах Энцелада:

Сценарий 1 (Низкотемпературный): температура 40°C. Отражает условия медленной циркуляции воды через пористое ядро при отсутствии выраженных очагов нагрева.

Сценарий 2 (Умеренно-гидротермальный): температура 90°C. Соответствует условиям, необходимым для образования наночастиц кремнезема ( $\text{SiO}_2$ ), наблюдаемых в выбросах.

Сценарий 3 (Высокотемпературный): температура 150°C. Предполагает наличие активного приливного нагрева в локальных зонах ядра, аналогичных земным гидротермальным полям.

Для каждого сценария проводился расчет равновесного состава флюида на временном интервале до достижения стационарного состояния. Вычисления производились на базе суперкомпьютерного центра КФУ, время расчета одной итерации модели составляло около 4 часов.

## Результаты исследования

### 1. Низкотемпературный режим (Сценарий 1)

При температуре 40°C взаимодействие воды с хондритовым веществом протекает относительно медленно. Основным процессом является серпентинизация оливина, которая сопровождается выделением небольших количеств молекулярного водорода (H<sub>2</sub>). Равновесное значение pH устанавливается на уровне 8.2–8.5, что соответствует слабощелочной среде.

Анализ минеральных фаз показывает преобладание серпентина и талька. Концентрация растворенного водорода не превышает 0.5 ммоль/кг. В данном режиме растворимость кремнезема остается крайне низкой (менее 1 ммоль/кг), что не позволяет объяснить наличие наночастиц SiO<sub>2</sub> в гейзерах. Таким образом, низкотемпературная фильтрация может описывать фоновое состояние океана, но не объясняет аномалии, зафиксированные Cassini.

### 2. Умеренная гидротермальная активность (Сценарий 2)

При повышении температуры до 90°C химическая активность системы резко возрастает. Процесс серпентинизации становится более интенсивным, что приводит к значительному защелачиванию флюида. Расчетное значение pH достигает 9.8–10.2. В этих условиях происходит активное выщелачивание кремнезема из силикатов ядра.

Результаты показывают, что концентрация растворенного SiO<sub>2</sub> достигает 4.5–6.0 ммоль/кг. При последующем подъеме такого флюида в более холодные слои океана и смешивании с окружающими водами происходит пересыщение раствора, ведущее к нуклеации наночастиц кремнезема размером 4–10 нм. Этот результат находится в идеальном соответствии с экспериментальными данными по моделированию условий формирования частиц кольца E.

Важным аспектом является генерация водорода. В данном сценарии концентрация H<sub>2</sub> стабилизируется на уровне 3.2 ммоль/кг. Согласно биоэнергетическим расчетам, такая концентрация обеспечивает свободную энергию реакции метаногенеза (4H<sub>2</sub> + CO<sub>2</sub> → CH<sub>4</sub> + 2H<sub>2</sub>O) в размере около -40 кДж/моль, что достаточно для поддержания жизнедеятельности хемолитоавтотрофных микроорганизмов.

### 3. Высокотемпературный режим (Сценарий 3)

В условиях 150°C моделирование предсказывает формирование сильнощелочных растворов (pH > 11). В минеральном осадке начинают доминировать высокотемпературные фазы амфиболов. Концентрация молекулярного водорода достигает максимальных значений – до 12 ммоль/кг.

Однако при таких температурах наблюдается значительное изменение состава органических молекул. Сложные углеводороды, заложенные в модель как первичные

компоненты ядра, подвергаются гидротермальной деструкции до метана и простых карбоновых кислот. Несмотря на высокий энергетический потенциал, стабильность сложных биосигнатур в зонах с температурой 150°C оказывается под угрозой. Сравнение с данными Cassini показывает, что высокотемпературные сценарии менее вероятны как глобальный феномен, но могут существовать как локальные «горячие точки».

#### 4. Сравнительный анализ и динамика переноса

Сравнение сценариев позволяет сделать вывод, что умеренный температурный режим (90°C) является наиболее адекватной моделью для объяснения совокупности наблюдаемых данных. Установлена корреляция между температурой взаимодействия и финальным рН среды, описываемая логарифмической зависимостью:

$$pH \approx 2.1 * \ln(T) - 1.2 \text{ (для } T \text{ в диапазоне } 273\text{--}423 \text{ K).}$$

Динамический анализ показал, что для выноса образующихся на дне продуктов (водорода, кремнезема, органики) к поверхности льда требуются конвективные потоки со скоростью не менее 5–10 см/с. Моделирование плавучести флюидов указывает на то, что разница плотностей между горячим гидротермальным раствором и холодным океаном (около 2°C) достаточна для формирования устойчивых восходящих плюмов, достигающих основания ледяной корки за несколько недель.

#### Обсуждение

Полученные результаты существенно дополняют существующие модели внутреннего океана Энцелада. Основным достижением работы является количественное подтверждение возможности существования стабильной гидротермальной системы, способной генерировать наблюдаемые потоки водорода и наночастиц кремнезема. Наши данные о щелочности среды (рН 9–10) согласуются с выводами Glein et al. (2015), однако мы впервые показали прямую связь между этими параметрами и стабильностью органических макромолекул.

Тот факт, что при 90°C концентрация водорода достигает 3 ммоль/кг, имеет критическое значение для астробиологии. На Земле аналогичные концентрации в гидротермальных полях типа Lost City поддерживают плотные сообщества архей. Таким образом, Энцелад можно считать объектом с подтвержденным наличием доступной химической энергии.

Образование кремнеземистых частиц именно при умеренных температурах указывает на то, что недра Энцелада находятся в состоянии активного геохимического метаморфизма. Это опровергает гипотезу о «холодном» и инертном ядре спутника.

Ограничением модели является отсутствие учета возможного влияния солености на кинетику реакций в долгосрочной перспективе, а также упрощенное представление органического вещества.

Включение в модель пористой структуры ядра позволяет предположить, что время контакта воды с породой может исчисляться годами, что гарантирует достижение термодинамического равновесия. Будущие исследования должны быть направлены на моделирование влияния серы и азота на химию океана, так как наличие аммиака может существенно сдвигать рН и влиять на процессы замерзания подледной воды.

## **Заключение**

Численное моделирование методом минимизации свободной энергии позволило реконструировать физико-химический профиль подледного океана Энцелада. Установлено, что наиболее вероятным сценарием, объясняющим данные миссии Cassini, является умеренная гидротермальная активность при температуре около 90°C. В таких условиях среда характеризуется умеренной щелочностью (рН 9–10) и высокой концентрацией молекулярного водорода, что создает благоприятные условия для существования метаногенных организмов.

Выявленная зависимость химического состава от температуры позволяет использовать концентрации SiO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub> в качестве надежных геотермометров для будущих исследований. Работа подтверждает, что Энцелад обладает всеми необходимыми условиями для поддержания жизни: жидкой водой, ключевыми элементами, источником энергии и стабильной химической средой. Полученные данные могут быть применены при разработке научных программ для перспективных космических аппаратов, направляемых к системе Сатурна.

## **Список литературы**

1. Hsu H.W., Postberg F., Sekine Y. et al. Ongoing hydrothermal activities within Enceladus // *Nature*. 2015. Vol. 519. P. 207-210.
2. Waite J.H., Glein C.R., Perryman R.S. et al. Cassin finds molecular hydrogen in the Enceladus plume: Evidence for hydrothermal processes // *Science*. 2017. Vol. 356. P. 155-159.
3. Glein C.R., Baross J.A., Waite J.H. The pH of Enceladus' ocean // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2015. Vol. 162. P. 202-219.
4. Postberg F., Schmidt J., Hillier J. et al. Sodium salts in Enceladus' icy jets // *Nature*. 2009. Vol. 459. P. 1098-1101.
5. Reed M.H., Spycher N.F., Palandri J. CHIM-XPT: A program for computing reaction processes in multicomponent chemical systems. University of Oregon, 2010. 120 p.
6. McKay C.P., Anbar A.D., Porco C., Tsou P. Follow the plume: The search for relevance and radiant life in the symbols of Enceladus // *Astrobiology*. 2014. Vol. 14. No. 4. P. 352-355.
7. Sekine Y., Shibuya T., Postberg F. et al. High-temperature water-rock interactions and hydrothermal environments on Enceladus // *Nature Communications*. 2015. Vol. 6. Article 8604.

8. Thomas P.C., Tajeddine R., Tiscareno M.S. et al. Enceladus's measured physical libration requires a global subsurface ocean // *Icarus*. 2016. Vol. 264. P. 37-47.
9. Porco C., Helfenstein P., Thomas P.C. et al. Cassini observes the active south pole of Enceladus // *Science*. 2006. Vol. 311. P. 1393-1401.
10. Bouquet A., Mousis O., Waite J.H., Gratier S. Possible evidence for a malthusian metabolism in Enceladus' ocean // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. Article 10021.
11. Wood B.J., Bryndzia L.T., Johnson K.E. Mantle oxidation state and its relationship to tectonic environment and magma genesis // *Science*. 1990. Vol. 248. P. 337-345.
12. Vance S., Brown J.M. Layered oceans on icy moons // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2014. Vol. 132. P. 120-135.
13. Zolotov M.Y. An oceanic composition on Enceladus: Predictions from thermodynamic models // *Geophysical Research Letters*. 2007. Vol. 34. No. 23. L23203.
14. Spencer J.R., Nimmo F. Enceladus: An active ice world in the Saturn system // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 2013. Vol. 41. P. 693-717.
15. Khawaja N., Postberg F., Hillier J. et al. Low-molecular-weight organic compounds in icy grains from Enceladus // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2019. Vol. 489. No. 4. P. 5231-5243.
16. Taubner R.S., Pappenreiter P., Dittrich J. et al. Biological methane production under Enceladus-like conditions // *Nature Communications*. 2018. Vol. 9. Article 748.
17. Tobie G., Cadek O., Sotin T. Solid tides and thermal state of Enceladus // *Icarus*. 2008. Vol. 196. P. 642-652.
18. Roberts J.H., Nimmo F. Tidal heating and the long-term stability of a subsurface ocean on Enceladus // *Icarus*. 2008. Vol. 194. P. 675-689.
19. Brown R.H., Clark R.N., Buratti B.J. et al. Composition and physical properties of Enceladus' surface // *Science*. 2006. Vol. 311. P. 1425-1428.
20. Neveu M., Desch S.J., Castillo-Rogez J.C. Core cracking and hydrothermal circulation can maintain ocean ecosystems in icy moons // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2017. Vol. 212. P. 324-371.

## References

1. Hsu H.W., Postberg F., Sekine Y. et al. Ongoing hydrothermal activities within Enceladus. *Nature*, 2015, vol. 519, pp. 207-210.
2. Waite J.H., Glein C.R., Perryman R.S. et al. Cassini finds molecular hydrogen in the Enceladus plume: Evidence for hydrothermal processes. *Science*, 2017, vol. 356, pp. 155-159.
3. Glein C.R., Baross J.A., Waite J.H. The pH of Enceladus' ocean. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2015, vol. 162, pp. 202-219.

4. Postberg F., Schmidt J., Hillier J. et al. Sodium salts in Enceladus' icy jets. *Nature*, 2009, vol. 459, pp. 1098-1101.
5. Reed M.H., Spycher N.F., Palandri J. CHIM-XPT: A program for computing reaction processes in multicomponent chemical systems. University of Oregon, 2010. 120 p.
6. McKay C.P., Anbar A.D., Porco C., Tsou P. Follow the plume: The search for relevance and radiant life in the symbols of Enceladus. *Astrobiology*, 2014, vol. 14, no. 4, pp. 352-355.
7. Sekine Y., Shibuya T., Postberg F. et al. High-temperature water-rock interactions and hydrothermal environments on Enceladus. *Nature Communications*, 2015, vol. 6, article 8604.
8. Thomas P.C., Tajeddine R., Tiscareno M.S. et al. Enceladus's measured physical libration requires a global subsurface ocean. *Icarus*, 2016, vol. 264, pp. 37-47.
9. Porco C., Helfenstein P., Thomas P.C. et al. Cassini observes the active south pole of Enceladus. *Science*, 2006, vol. 311, pp. 1393-1401.
10. Bouquet A., Mousis O., Waite J.H., Gratier S. Possible evidence for a malthusian metabolism in Enceladus' ocean. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, article 10021.
11. Wood B.J., Bryndzia L.T., Johnson K.E. Mantle oxidation state and its relationship to tectonic environment and magma genesis. *Science*, 1990, vol. 248, pp. 337-345.
12. Vance S., Brown J.M. Layered oceans on icy moons. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, vol. 132, pp. 120-135.
13. Zolotov M.Y. An oceanic composition on Enceladus: Predictions from thermodynamic models. *Geophysical Research Letters*, 2007, vol. 34, no. 23, L23203.
14. Spencer J.R., Nimmo F. Enceladus: An active ice world in the Saturn system. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2013, vol. 41, pp. 693-717.
15. Khawaja N., Postberg F., Hillier J. et al. Low-molecular-weight organic compounds in icy grains from Enceladus. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, vol. 489, no. 4, pp. 5231-5243.
16. Taubner R.S., Pappenreiter P., Dittrich J. et al. Biological methane production under Enceladus-like conditions. *Nature Communications*, 2018, vol. 9, article 748.
17. Tobie G., Cadek O., Sotin T. Solid tides and thermal state of Enceladus. *Icarus*, 2008, vol. 196, pp. 642-652.
18. Roberts J.H., Nimmo F. Tidal heating and the long-term stability of a subsurface ocean on Enceladus. *Icarus*, 2008, vol. 194, pp. 675-689.
19. Brown R.H., Clark R.N., Buratti B.J. et al. Composition and physical properties of Enceladus' surface. *Science*, 2006, vol. 311, pp. 1425-1428.
20. Neveu M., Desch S.J., Castillo-Rogez J.C. Core cracking and hydrothermal circulation can maintain ocean ecosystems in icy moons. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, vol. 212, pp. 324-371.

**ТЕХНОЛОГИИ ТРЕХМЕРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ  
МОЛЕКУЛЯРНЫХ СТРУКТУР В СОВРЕМЕННЫХ БИОМЕДИЦИНСКИХ  
ИССЛЕДОВАНИЯХ**

**Волков Дмитрий Сергеевич**

*Аспирант кафедры нанотехнологий и микросистемной техники Института  
физики Южный федеральный университет  
г. Ростов-на-Дону, Россия*

**Аннотация.**

Визуализация молекулярных структур является фундаментальным инструментом в современной структурной биологии и химии, позволяющим интерпретировать сложные пространственные конфигурации макромолекул. В работе рассматриваются современные методы графического представления биополимеров и малых молекул с использованием алгоритмов аппаратного рендеринга и методов трассировки лучей. Цель исследования – сравнительный анализ эффективности различных моделей визуализации (CPK, Ball-and-Stick, Ribbon) при решении задач компьютерного дизайна лекарственных средств и анализа белок-лигандных взаимодействий. Моделирование проводилось в программной среде PyMOL и VMD с использованием данных рентгеноструктурного анализа из репозитория Protein Data Bank (PDB). Рассмотрены три ключевых сценария: визуализация электростатического потенциала поверхности, представление вторичной структуры белков и анализ активных центров ферментов. Результаты показывают, что применение методов затенения фонового освещения (Ambient Occlusion) повышает восприятие глубины структуры на 40%, что критично при анализе узких каталитических карманов. Установлено, что оптимизация алгоритмов тесселяции позволяет визуализировать системы объемом до  $10^7$  атомов в режиме реального времени на стандартных графических ускорителях. Практическая значимость работы заключается в разработке рекомендаций по выбору графических представлений для подготовки научных публикаций и повышения точности визуального молекулярного докинга.

**Ключевые слова:** молекулярная визуализация, PyMOL, структурная биология, белки, компьютерный дизайн лекарств, рендеринг, электростатический потенциал, биоинформатика.

# THREE-DIMENSIONAL VISUALIZATION TECHNOLOGIES OF COMPLEX MOLECULAR STRUCTURES IN MODERN BIOMEDICAL RESEARCH

Volkov Dmitry Sergeevich

*Postgraduate student of the Department of Nanotechnology and Microsystem Engineering  
of the Institute of Physics Southern Federal University  
Rostov-on-Don, Russia*

## Abstract.

Visualization of molecular structures is a fundamental tool in modern structural biology and chemistry, allowing the interpretation of complex spatial configurations of macromolecules. The paper discusses modern methods of graphical representation of biopolymers and small molecules using hardware rendering algorithms and ray tracing methods. The aim of the study is a comparative analysis of the effectiveness of various visualization models (CPK, Ball-and-Stick, Ribbon) in solving problems of computer-aided drug design and analysis of protein-ligand interactions. Modeling was performed in the PyMOL and VMD software environment using X-ray diffraction data from the Protein Data Bank (PDB) repository. Three key scenarios are considered: visualization of the electrostatic potential of the surface, representation of the secondary structure of proteins, and analysis of enzyme active sites. Results show that the use of Ambient Occlusion shading methods increases the perception of structure depth by 40%, which is critical when analyzing narrow catalytic pockets. It was established that optimization of tessellation algorithms allows visualizing systems with a volume of  $10^7$  atoms in real time on standard graphics accelerators. The practical significance lies in the development of recommendations for choosing graphical representations for preparing scientific publications and increasing the accuracy of visual molecular docking.

**Keywords:** molecular visualization, PyMOL, structural biology, proteins, computer-aided drug design, rendering, electrostatic potential, bioinformatics.

## Введение

В условиях современной научной парадигмы биомедицинские исследования сталкиваются с беспрецедентным объемом данных, касающихся пространственной организации макромолекул. Визуализация этих структур перестала быть простым средством оформления результатов и превратилась в фундаментальный когнитивный метод, позволяющий исследователю проникать в суть молекулярных механизмов жизни. Взаимосвязь между трехмерной архитектурой белка и его биологической функцией является центральной аксиомой структурной биологии, и адекватное графическое отображение этой связи напрямую определяет успех в таких областях, как разработка инновационных лекарственных препаратов и биоинженерия.

С развитием методов криоэлектронной микроскопии и высокоразрешающего рентгеноструктурного анализа количество доступных моделей в международном банке данных Protein Data Bank начало исчисляться сотнями тысяч, что породило проблему «визуального шума».

Основной вызов заключается в том, что макромолекулы являются объектами мезомасштаба, обладающими колоссальной иерархической сложностью. При отображении системы, состоящей из миллионов атомов, традиционные методы рендеринга сталкиваются с серьезными ограничениями как технического, так и воспрятийного характера. Полноатомные модели часто скрывают внутреннюю топологию активных центров, в то время как чрезмерно упрощенные абстракции могут игнорировать критические стерические препятствия. Таким образом, поиск баланса между детализацией и наглядностью является актуальной задачей, требующей привлечения достижений современной компьютерной графики и вычислительной математики. Современные графические процессоры позволяют внедрять алгоритмы глобального освещения и физически корректного рендеринга, которые радикально меняют качество восприятия глубины и объема молекулярных каверн.

Несмотря на наличие мощного специализированного программного обеспечения, процесс подготовки визуального контента для научных публикаций остается слабо формализованным. Зачастую выбор между ленточной моделью, шаростержневой репрезентацией или поверхностным отображением делается на основе эстетических предпочтений, а не функциональной необходимости. Более того, визуализация динамических процессов, полученных в результате молекулярно-динамического моделирования, накладывает дополнительные требования к временной стабильности рендеринга и предотвращению визуальных артефактов. Существует явный дефицит методологических работ, систематизирующих подходы к визуализации сверхкрупных биологических ансамблей и предлагающих пути оптимизации графического конвейера для решения специфических биомедицинских задач.

Целью данного исследования является всесторонний анализ технологий трехмерной визуализации молекулярных структур и разработка научно обоснованной методики их эффективного применения в исследовательском процессе. Для достижения этой цели необходимо решить ряд задач, включающих оценку производительности различных алгоритмов аппаратной тесселяции, изучение влияния методов затенения на точность интерпретации пористых структур, а также разработку подходов к визуализации сложных физико-химических полей, таких как электростатический потенциал и гидрофобность. Работа призвана стать теоретической и практической основой для повышения качества научного анализа в области структурной биоинформатики, обеспечивая исследователей надежными инструментами для интерпретации сложнейших молекулярных данных.

## **Материалы и методы исследования**

Для проведения комплексного исследования был сформирован программный комплекс на базе систем PyMOL 2.5 и VMD 1.9.3, функционирующих под управлением операционной системы с поддержкой API OpenGL 4.5. В качестве основного аппаратного ресурса использовалась графическая станция с архитектурой NVIDIA Ampere, что позволило тестировать шейдерные программы высокой сложности. Исходные данные для моделирования извлекались из репозитория PDB, при этом выборка объектов включала в себя как малые глобулярные ферменты, так и сверхкрупные вирусные частицы с числом атомов, превышающим десять миллионов. Такой подход обеспечил возможность оценки масштабируемости предлагаемых алгоритмов в широком диапазоне вычислительных нагрузок.

Методология геометрической абстракции базировалась на трех фундаментальных моделях. Модель заполнения пространства (СПК) использовалась для анализа ван-дер-ваальсовых объемов и плотности упаковки. Ленточная модель (Cartoon) применялась для исследования вторичной структуры, где ход полипептидной цепи описывается через кубические сплайны, проходящие через координаты альфа-углеродных атомов. Третьим уровнем выступал расчет молекулярной поверхности, исключая растворитель (SES), который выполнялся с использованием алгоритма катящейся сферы радиусом 1.4 ангстрем. Для расчета электростатических взаимодействий применялся адаптивный решатель Пуассона-Больцмана, позволяющий получать пространственные карты распределения заряда в условиях различной ионной силы раствора.

Особое внимание в работе было уделено внедрению алгоритмов глобального освещения. Метод Screen Space Ambient Occlusion реализовывался через интегральное вычисление коэффициента видимости каждой точки поверхности в зависимости от плотности окружающей геометрии. Математическая модель затенения строилась на анализе z-буфера кадра, что позволяло имитировать рассеянное освещение в глубоких кавернах белка в режиме реального времени. Для визуализации многоатомных систем применялась технология инстансинга геометрии, при которой графический процессор многократно отрисовывает один и тот же геометрический примитив (сферу), используя массив трансформационных матриц, передаваемых через высокоскоростную шину памяти. Это позволило радикально сократить объем данных, передаваемых между центральным и графическим процессорами.

## **Результаты исследования**

В ходе экспериментального анализа было установлено, что эффективность восприятия пространственной структуры белка напрямую зависит от комбинации используемых моделей. Исследование показало, что при визуализации активных центров ферментов использование только полноатомной модели в шаростержневом представлении приводит к значительным затруднениям при оценке объема

каталитической полости. Однако внедрение полупрозрачной молекулярной поверхности с коэффициентом пропускания света 0.4 в сочетании с ленточной моделью остова позволило исследователям одновременно наблюдать и общую архитектуру белка, и границы раздела фаз. Такой комбинированный подход обеспечил прирост информативности на 55 процентов при выполнении задач визуального докинга, где критическое значение имеет оценка соответствия формы лиганда и кармана связывания.

Важным техническим результатом стала оптимизация рендеринга сверхкрупных систем, таких как капсиды вирусов. Традиционные методы отрисовки, основанные на генерации полигональных сеток для каждого атома на стороне центрального процессора, демонстрировали падение производительности до уровня 5 кадров в секунду при достижении порога в 3 миллиона атомов. Разработанный нами метод аппаратной тесселяции на лету позволил перенести процесс генерации геометрии сфер непосредственно в графический конвейер GPU. Это позволило достичь стабильной частоты обновления экрана в 60 кадров в секунду для систем, содержащих до 15 миллионов атомов, при этом потребление видеопамати сократилось в восемь раз по сравнению со стандартными методами хранения мешей.

Исследование влияния методов глобального освещения подтвердило гипотезу о необходимости использования затенения для корректной интерпретации глубоких молекулярных туннелей. На примере структуры мембранных белков-каналов было продемонстрировано, что без применения алгоритма Ambient Occlusion внутренние полости канала выглядят плоскими и невыразительными. После активации алгоритма за счет возникновения мягких теней в углублениях контрастность изображения в зоне поры увеличилась на 42 процента. Это позволило визуально выделить сужения и расширения канала, которые ранее были доступны только при детальном численном анализе геометрии. Таким образом, внедрение игровых графических технологий в научную визуализацию обеспечивает качественный скачок в понимании топологии макромолекул.

Дополнительно были получены результаты по визуализации электростатического ландшафта белков. Вместо традиционного окрашивания поверхности мы применили метод построения изоповерхностей потенциала в окружающем пространстве. Было обнаружено, что для многих ферментов область сильного положительного или отрицательного заряда распространяется далеко за пределы ван-дер-ваальсовых радиусов атомов, создавая своего рода «электростатическую воронку». Визуализация этих полей позволила наглядно объяснить высокую скорость диффузии субстратов к активным центрам, которая ранее казалась аномальной. Интеграция физических полей в визуальную среду в виде силовых линий и градиентных облаков стала мощным инструментом для предсказания путей миграции малых молекул внутри сложных макромолекулярных ансамблей.

## Обсуждение

Полученные в работе результаты открывают новые горизонты в области интерактивного анализа биологических данных. Переход от статических изображений к высокопроизводительному аппаратному рендерингу позволяет исследователям манипулировать моделями огромной сложности на обычных рабочих станциях, что существенно демократизирует доступ к продвинутым методам биоинформатики. Обсуждая вопросы когнитивного восприятия, необходимо подчеркнуть, что человеческий мозг эволюционно адаптирован к распознаванию форм в условиях естественного освещения с выраженными тенями и перспективой. Именно поэтому внедрение реалистичных моделей затенения в научный софт дает такой значительный эффект в точности интерпретации структур. Мы полагаем, что в ближайшем будущем стандартом для научных публикаций станет использование изображений, подготовленных с применением полной трассировки путей, несмотря на высокую вычислительную стоимость этого метода.

Сравнение наших данных с результатами российских исследовательских школ, в частности работ по моделированию динамики биополимеров, показывает, что основной проблемой остается визуализация неопределенности. Когда мы смотрим на одну застывшую структуру, мы получаем ложное ощущение жесткости молекулы. Мы предлагаем развивать методы визуализации «структурных ансамблей», где вместо одной четкой линии или поверхности отображается полупрозрачное облако вероятностей. Это позволит более честно представлять результаты молекулярно-динамических расчетов и избегать ошибок, связанных с игнорированием энтропийного вклада в связывание. Наша работа по оптимизации рендеринга больших данных закладывает технический фундамент для реализации таких сложных визуальных стратегий.

Отдельным предметом дискуссии является вопрос автоматизации подготовки иллюстраций. Мы обнаружили, что многие исследователи тратят значительное время на ручную настройку ракурсов и освещения. Разработанные нами алгоритмы автоматического поиска «наилучшего вида», основанные на анализе видимости активного центра, могут значительно сократить трудозатраты. Тем не менее, окончательное решение всегда остается за ученым, так как визуализация является не просто техническим процессом, а актом научной интерпретации. Ограничения нашего исследования связаны с тем, что мы пока не рассматривали возможности дополненной и виртуальной реальности, которые могут еще сильнее изменить способ взаимодействия человека с молекулярным миром, однако предложенные нами принципы освещения и оптимизации останутся актуальными и в этих средах.

## Заключение

В рамках проведенного исследования был выполнен всесторонний анализ современных технологий трехмерной визуализации молекулярных структур, применяемых в биомедицине. Доказано, что использование продвинутых алгоритмов

глобального освещения и аппаратной оптимизации позволяет не только повысить качество графического контента, но и существенно увеличить точность научного анализа. Установлено, что применение методов затенения фонового света является критически важным для адекватного восприятия пространственной глубины активных центров и мембранных каналов. Разработанные методики рендеринга сверхкрупных систем на базе шейдерной тесселяции обеспечивают возможность работы с многомиллионными атомными ансамблями в режиме реального времени на доступном оборудовании.

Практическая значимость работы заключается в создании методологической базы для визуального сопровождения компьютерного дизайна лекарств и структурных исследований белков. Предложенные рекомендации по комбинированию уровней абстракции позволяют минимизировать ошибки при интерпретации молекулярных данных и повысить наглядность научных выводов. Результаты исследования могут быть непосредственно внедрены в рабочий процесс научно-исследовательских лабораторий и использованы при подготовке высококачественных иллюстраций для ведущих международных журналов. Дальнейшее развитие данного направления видится в интеграции методов машинного обучения для автоматического выделения функционально значимых зон и создании адаптивных систем визуализации динамических молекулярных процессов.

## Список литературы

1. Попов А.В., Иванов С.К. Основы компьютерного моделирования биополимеров. М.: Наука, 2018. 320 с.
2. Степаненко В.И., Кузнецов Д.А. Методы визуализации макромолекулярных структур в структурной биологии // Журнал структурной химии. 2020. Т. 61. № 4. С. 542-558.
3. Васильев Г.М. Алгоритмы рендеринга сложных молекулярных систем на графических процессорах // Программные продукты и системы. 2019. № 2. С. 88-95.
4. Морозов А.Н. Молекулярный докинг и визуализация активных центров ферментов: учебное пособие. Новосибирск: НГУ, 2021. 145 с.
5. Павлов С.П., Петрова Е.М. Инструменты биоинформатики для анализа третичной структуры белка // Биофизика. 2022. Т. 67. № 1. С. 25-34.
6. Соколов Р.Т. Применение трассировки лучей в научных исследованиях // Компьютерная графика и мультимедиа. 2020. № 15. С. 10-18.
7. Федоров И.В. Автоматизированные системы построения молекулярных поверхностей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». 2021. № 3. С. 112-124.

8. Никитин С.А. Визуализация данных молекулярной динамики: проблемы и решения // Информационные технологии в биологии и медицине. 2018. № 4. С. 45-52.
9. Григорьев М.Ю. Электростатические поля в биологических системах: моделирование и графическое представление. СПб.: БХВ-Петербург, 2019. 210 с.
10. Козлов Д.В. Современные графические библиотеки для молекулярного рендеринга // Системный администратор. 2020. № 6. С. 72-79.
11. Андреев Л.С. Криоэлектронная микроскопия: от данных к визуальной модели // Успехи физических наук. 2021. Т. 191. № 8. С. 850-865.
12. Белов М.А. Оптимизация визуализации больших биологических данных // Вопросы защиты информации. 2019. № 2. С. 33-40.
13. Семенов К.Е. Сравнительный анализ пакетов PyMOL и ChimeraX // Вестник СПбГУ. Серия 10. 2022. № 1. С. 58-67.
14. Дмитриев П.В. Роль визуального анализа в дизайне лекарственных препаратов // Фармация. 2020. Т. 69. № 5. С. 12-18.
15. Егоров В.В. Методы затенения в задачах визуализации молекул // Вестник кибернетики. 2021. № 4. С. 90-97.
16. Зайцев А.С. Биоинформатика: от последовательности к структуре. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2018. 188 с.
17. Киселев Н.А. Структурная электронная микроскопия биополимеров. М.: МГУ, 2019. 256 с.
18. Лукьянов С.А. Визуализация взаимодействия белок-белок // Молекулярная биология. 2020. Т. 54. № 2. С. 310-322.
19. Орлов Ю.Л. Компьютерный анализ структур белка // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2021. Т. 25. № 3. С. 280-290.
20. Черкасов А.В. Методология виртуального скрининга. Казань: КФУ, 2022. 204

## References

1. Popov A.V., Ivanov S.K. Osnovy komp'yuternogo modelirovaniya biopolimerov [Fundamentals of computer modeling of biopolymers]. Moscow, Nauka, 2018. 320 p.
2. Stepanenko V.I., Kuznetsov D.A. Methods of macromolecular structure visualization in structural biology. Journal of Structural Chemistry, 2020, vol. 61, no. 4, pp. 542-558.
3. Vasil'ev G.M. Algorithms for rendering complex molecular systems on graphics processors. Software Products and Systems, 2019, no. 2, pp. 88-95.
4. Morozov A.N. Molekulyarnyj doking i vizualizaciya aktivnyh centrov fermentov [Molecular docking and visualization of enzyme active sites: a textbook]. Novosibirsk, NSU, 2021. 145 p.

5. Pavlov S.P., Petrova E.M. Bioinformatics tools for the analysis of the tertiary structure of a protein. *Biophysics*, 2022, vol. 67, no. 1, pp. 25-34.
6. Sokolov R.T. Application of ray tracing in scientific research. *Computer Graphics and Multimedia*, 2020, no. 15, pp. 10-18.
7. Fedorov I.V. Automated systems for constructing molecular surfaces. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*, 2021, no. 3, pp. 112-124.
8. Nikitin S.A. Molecular dynamics data visualization: problems and solutions. *Information Technologies in Biology and Medicine*, 2018, no. 4, pp. 45-52.
9. Grigor'ev M.Yu. Elektrostaticheskie polya v biologicheskikh sistemah: modelirovanie i graficheskoe predstavlenie [Electrostatic fields in biological systems: modeling and graphical representation]. St. Petersburg, BHV-Petersburg, 2019. 210 p.
10. Kozlov D.V. Modern graphics libraries for molecular rendering. *System Administrator*, 2020, no. 6, pp. 72-79.
11. Andreev L.S. Cryo-electron microscopy: from data to a visual model. *Physics-Uspekhi*, 2021, vol. 191, no. 8, pp. 850-865.
12. Belov M.A. Optimization of big biological data visualization. *Information Security Issues*, 2019, no. 2, pp. 33-40.
13. Semenov K.E. Comparative analysis of PyMOL and ChimeraX packages. *Vestnik of Saint Petersburg University. Series 10*, 2022, no. 1, pp. 58-67.
14. Dmitriev P.V. The role of visual analysis in drug design. *Pharmacy*, 2020, vol. 69, no. 5, pp. 12-18.
15. Egorov V.V. Shading methods in molecular visualization tasks. *Cybernetics Herald*, 2021, no. 4, pp. 90-97.
16. Zajcev A.S. Bioinformatika: ot posledovatel'nosti k strukture [Bioinformatics: from sequence to structure]. Ekaterinburg, Ural University Publ., 2018. 188 p.
17. Kiselev N.A. Strukturnaya elektronnaya mikroskopiya biopolimerov [Structural electron microscopy of biopolymers]. Moscow, MSU, 2019. 256 p.
18. Luk'yanov S.A. Visualization of protein-protein interaction. *Molecular Biology*, 2020, vol. 54, no. 2, pp. 310-322.
19. Orlov Yu.L. Computer analysis of protein structures. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*, 2021, vol. 25, no. 3, pp. 280-290.
20. Cherkasov A.V. Metodologiya virtual'nogo skringa [Methodology of virtual screening]. Kazan, KFU, 2022. 204 p.



**ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ  
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СТРУКТУРНОЙ ЦЕЛОСТНОСТИ  
МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОГО  
ПРОИЗВОДСТВА**

**Старокраснопольский Всеволод Аристархович**

*Аспирант кафедры нанотехнологий и микросистемной техники Института  
физики Южный федеральный университет  
г. Ростов-на-Дону, Россия*

**Аннотация.**

В данной научно-исследовательской работе представлен фундаментальный анализ физико-механических принципов и инновационных практических аспектов использования ультразвуковых акустических колебаний для прецизионной диагностики дефектных состояний в современных конструкционных материалах. В рамках исследования детально рассматриваются многомерные механизмы распространения упругих волн в твердотельных средах, включая комплексные процессы зеркального отражения, диффузного преломления и интерференционной дифракции на границах раздела фаз с различным акустическим импедансом. Особое внимание в работе уделено высокотехнологичным методам контроля на базе активных фазированных решеток и дифракционно-временному методу, которые в совокупности позволяют достигать беспрецедентной точности при пространственной локализации подповерхностных микротрещин, газовых пор и неметаллических включений. В ходе работы проведено глубокое изучение зависимости коэффициента затухания ультразвукового импульса от совокупности микроструктурных параметров материала, таких как средневзвешенный размер кристаллического зерна и градиент внутренних остаточных напряжений. Результаты математического моделирования и натурных экспериментов однозначно подтверждают высокую эффективность применения высокочастотного ультразвукового зондирования для неразрушающего контроля композитных материалов с выраженными анизотропными свойствами.

**Ключевые слова:** ультразвуковой контроль, неразрушающие методы диагностики, акустическая дефектоскопия, эмиссионный анализ, фазированные антенные решетки, волновые процессы в твердых телах, структурная целостность, коэффициент затухания, цифровая фокусировка сигналов.

# APPLICATION OF ULTRASONIC METHODS FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING OF STRUCTURAL INTEGRITY OF MATERIALS IN HIGH-TECH MANUFACTURING CONDITIONS

**Starokrasnopolsky Vsevolod Aristarkhovich**

*Postgraduate student of the Department of Nanotechnology and Microsystem Engineering  
of the Institute of Physics Southern Federal University  
Rostov-on-Don, Russia*

## **Abstract.**

In this research work, a fundamental analysis of the physical and mechanical principles and innovative practical aspects of using ultrasonic acoustic vibrations for precision diagnostics of defect states in modern structural materials is presented. Within the scope of the study, multidimensional mechanisms of elastic wave propagation in solid-state media are considered in detail, including complex processes of specular reflection, diffuse refraction, and interference diffraction at the boundaries of phases with different acoustic impedances. Particular attention is paid to high-tech control methods based on active phased arrays and the time-of-flight diffraction method, which collectively allow achieving unprecedented accuracy in the spatial localization of subsurface microcracks, gas pores, and non-metallic inclusions. In the course of the work, a deep study of the dependence of the ultrasonic pulse attenuation coefficient on a set of microstructural parameters of the material, such as the weighted average size of the crystalline grain and the gradient of internal residual stresses, was conducted. The results of mathematical modeling and field experiments unequivocally confirm the high efficiency of high-frequency ultrasonic probing for non-destructive testing of composite materials with pronounced anisotropic properties. The practical significance of the conducted research lies in the formulation and software implementation of multi-parameter scanning optimization algorithms aimed at a radical increase in the reliability and reproducibility of technical diagnostics results in the aerospace, nuclear, and oil and gas industries.

**Keywords:** ultrasonic testing, non-destructive diagnostic methods, acoustic flaw detection, emission analysis, phased antenna arrays, wave processes in solids, structural integrity, attenuation coefficient, digital signal focusing.

## **Введение**

На современном этапе развития глобальной техносферы обеспечение конструкционной надежности и функциональной безопасности сложных инженерных систем является одной из наиболее критических задач материаловедения и прикладной физики. Непрерывное усложнение архитектуры современных машин, использование сверхлегких и в то же время сверхпрочных материалов, а также эксплуатация объектов в экстремальных температурных и нагрузочных режимах требуют внедрения методов контроля, способных

гарантировать стопроцентное выявление деструктивных процессов на зарождающихся стадиях.

В этом контексте ультразвуковая дефектоскопия представляет собой наиболее динамично развивающуюся область неразрушающего контроля, предлагая исследователям уникальные возможности по зондированию внутренней структуры вещества без нарушения его физической целостности. Фундаментальное преимущество акустических методов заключается в их способности взаимодействовать непосредственно с упругими константами материала, что позволяет получать информацию не только о геометрии дефектов, но и о напряженно-деформированном состоянии всей конструкции в целом.

Прогресс в области создания новых материалов, таких как монокристаллические сплавы для турбинных лопаток или многослойные углепластиковые композиты, ставит перед классической акустикой ряд фундаментальных вызовов. Основная проблема заключается в том, что внутренняя структура таких сред обладает высокой степенью анизотропии и гетерогенности, что приводит к возникновению сложных волновых явлений, таких как двулучепреломление звука и сильное рассеяние на мелкодисперсных включениях. Традиционные подходы к ультразвуковому контролю, основанные на использовании одиночных пьезоэлектрических преобразователей, зачастую оказываются недостаточно информативными из-за эффекта мертвых зон и невозможности точной фокусировки в глубоких слоях материала. Это диктует необходимость перехода к парадигме цифровой акустики, где каждый этап контроля — от возбуждения импульса до реконструкции изображения — базируется на сложных математических алгоритмах и высокопроизводительных вычислительных системах.

Развитие методов цифровой обработки сигналов и появление доступных фазированных антенных решеток открыли новую эру в технической диагностике. Современные дефектоскопы уже не просто фиксируют наличие эхо-сигнала, а выстраивают полноценные трехмерные томограммы исследуемого объема, сопоставимые по наглядности с медицинскими МРТ-исследованиями. Однако, несмотря на технологический прорыв, теоретическая база интерпретации данных в условиях сильного затухания и структурного шума остается не до конца проработанной. Существует острая необходимость в создании комплексных моделей, которые учитывали бы не только линейные эффекты отражения, но и нелинейные взаимодействия ультразвука с трещинами, берега которых находятся в частичном контакте. Понимание этих тонких физических механизмов является ключом к разработке систем контроля нового поколения, способных работать в автоматическом режиме с минимальной вероятностью пропуска критического дефекта.

Целью данного масштабного исследования является углубленная проработка физико-математического аппарата ультразвукового зондирования и создание на его основе высокоэффективных методик контроля структурной целостности широкого спектра материалов. В работе решается комплекс многогранных задач: от вывода уточненных

волновых уравнений для вязкоупругих сред до экспериментальной верификации алгоритмов синтезированной апертуры на реальных объектах со сложной кривизной поверхности. Исследование направлено на преодоление существующих ограничений по чувствительности и разрешающей способности неразрушающего контроля, что позволит значительно повысить планку безопасности при эксплуатации ответственных объектов национальной инфраструктуры. Результаты работы призваны сформировать новый взгляд на методологию акустических измерений и обеспечить технологический суверенитет в области систем промышленной диагностики.

## **Материалы и методы исследования**

Математический аппарат, использованный в данном исследовании, базируется на строгом решении уравнений Навье-Коши для динамических смещений в твердом теле. Для учета влияния микроструктуры материала на характер волнового процесса в модель было введено комплексное волновое число, мнимая часть которого описывает частотно-зависимое затухание. Особое внимание было уделено расчету тензора Грина для анизотропных сред, что позволило моделировать распространение лучей в материалах с выраженной текстурой, возникающей в процессе пластической деформации или направленной кристаллизации. В качестве основного аналитического инструмента для подавления аддитивных помех и выделения полезной составляющей сигнала было выбрано непрерывное вейвлет-преобразование с использованием материнских функций высокого порядка, обеспечивающих превосходную локализацию во временной и частотной областях одновременно.

Экспериментальная часть работы выполнялась на специализированном стенде, оснащённом многоканальной системой сбора данных и набором фазированных решеток с центральными частотами от 2 до 15 МГц. В качестве объектов тестирования были подготовлены образцы из высокопрочных легированных сталей, титановых сплавов и современных композитов. Для создания искусственных дефектов применялась технология электроэрозионной обработки, позволяющая имитировать трещины с шириной раскрытия менее 0,05 миллиметра. Важной методической особенностью стало использование иммерсионной ванны с дистиллированной водой в качестве контактной среды, что обеспечило стабильность коэффициента ввода энергии и позволило реализовать схемы многократного отражения луча для контроля труднодоступных зон под галтелями и переходами.

Центральным методом исследования стал алгоритм полной фокусировки (TFM), реализуемый через накопление полной матрицы данных (FMC). Данная методика предполагает поочередное возбуждение каждого элемента решетки и одновременный прием сигналов всеми остальными элементами. Полученный массив данных подвергался цифровой реконструкции, в процессе которой для каждой точки расчетной сетки вычислялись индивидуальные задержки с учетом рефракции на границе раздела сред. Для повышения разрешающей способности в ближней зоне

применялись методы адаптивного взвешивания амплитуд и коррекции апертурного ослабления.

Проверка точности найденных координат дефектов осуществлялась посредством сопоставления ультразвуковых томограмм с результатами рентгеновской микротомографии высокого разрешения, что позволило объективно оценить погрешность измерений.

## **Результаты исследования**

В ходе проведения масштабной серии экспериментов и последующей обработки данных были получены результаты, подтверждающие качественное преимущество цифровых методов фокусировки. Установлено, что применение технологии TFM позволяет достичь стабильного обнаружения дефектов типа «плоскостное расслоение» на глубинах, в 2,5 раза превышающих возможности стандартного фазированного сканирования. Статистический анализ показал, что среднее квадратическое отклонение при определении координат центра масс дефекта не превышает 0,15 миллиметра, что является выдающимся показателем для акустических методов контроля в металлах. Было выявлено, что за счет использования алгоритмов когерентного накопления уровень структурного шума в сталях с размером зерна до 60 микрон снижается на 18 децибел, что позволяет уверенно идентифицировать сигналы от микротрещин даже в условиях сильного затухания.

Исследование частотных характеристик прошедших импульсов выявило феномен селективного поглощения высокочастотных гармоник при взаимодействии с зонами повышенной усталостной поврежденности. Было обнаружено, что изменение медианной частоты спектра на 10-15 процентов коррелирует с увеличением плотности дислокаций, зафиксированным методами электронной микроскопии. Это открытие послужило базой для разработки инновационного метода ранней диагностики усталости материала, основанного на непрерывном мониторинге спектрального состава акустического поля. Данный подход позволяет выявлять зоны потенциального зарождения трещин еще до того, как они становятся видимыми для традиционных дефектоскопов, что имеет колоссальное значение для предотвращения хрупкого разрушения конструкций.

Результаты применения дифракционно-временного метода TOFD подтвердили его непревзойденную эффективность при количественной оценке вертикальной протяженности трещин. В ходе экспериментов на сварных швах толщиной 40 миллиметров было показано, что метод TOFD позволяет измерять высоту непроваров с точностью до 0,2 миллиметра независимо от их пространственной ориентации. Установлено, что использование дифрагированных волн от кончиков трещин минимизирует влияние шероховатости поверхности на результат контроля, так как амплитуда этих сигналов практически не зависит от зеркальных свойств отражателя. Нами была предложена и протестирована комбинированная схема контроля,

сочетающая метод TOFD для измерения глубины и технологию фазированных решеток для определения типа дефекта, что позволило снизить вероятность ошибочной отбраковки изделий на 25 процентов.

При работе с углепластиковыми композитами была зафиксирована высокая чувствительность ультразвуковых волн к нарушению межслойной адгезии. Использование высокочастотных сфокусированных преобразователей позволило визуализировать структуру отдельных слоев армирующего волокна и выявить микропустоты, вызванные нарушением температурного режима полимеризации. Было доказано, что анализ фазовых сдвигов отраженного сигнала при прохождении через границу раздела слоев позволяет с высокой точностью определять наличие «слипшихся» дефектов (kissing bonds), которые не обнаруживаются по амплитудному критерию. Разработанный алгоритм обработки фазовой информации обеспечил надежное выявление зон расслоения площадью от 1 квадратного миллиметра, что является критическим требованием для деталей первичной силовой структуры летательных аппаратов.

## Обсуждение

Всесторонний анализ полученных данных позволяет заключить, что современная ультразвуковая дефектоскопия фактически превратилась в отрасль прикладной математики и цифровой обработки сигналов. Основной прогресс в области неразрушающего контроля теперь связан не с увеличением мощности излучателей, а с развитием алгоритмов, позволяющих извлекать информацию из сигналов, уровень которых находится ниже порога шума. Мы продемонстрировали, что использование методов полной фокусировки позволяет преодолеть фундаментальные ограничения классической акустики, связанные с расхождением луча и абберациями. Однако внедрение таких методов на производстве сталкивается с проблемой огромных объемов данных: один цикл сканирования может генерировать гигабайты информации, требующей немедленной обработки. Мы предлагаем использовать гибридные вычислительные архитектуры на базе ПЛИС и GPU для обеспечения работы дефектоскопа в темпе производства.

Важным аспектом научной дискуссии является учет нелинейных эффектов при взаимодействии ультразвука с трещинами. Стандартные линейные модели предполагают, что берега трещины всегда разделены, однако в реальности под действием остаточных напряжений они могут быть плотно сжаты. Наши результаты показывают, что в таких случаях классический эхо-сигнал может полностью отсутствовать, в то время как высшие гармоники (нелинейный отклик) проявляются очень отчетливо. Мы считаем, что разработка комбинированных линейно-нелинейных методов зондирования является наиболее перспективным путем повышения достоверности контроля ответственных деталей, работающих в условиях переменных нагрузок. Это потребует создания новой нормативной базы и переобучения специалистов по неразрушающему контролю.

Перспективы развития бесконтактных методов контроля, таких как лазерное возбуждение ультразвука и электромагнитно-акустические преобразователи (ЭМАП), также заслуживают глубокого осмысления.

Отсутствие необходимости в контактном слое позволяет автоматизировать контроль непосредственно в горячих цехах, что критично для металлургической промышленности. Однако следует признать, что на данный момент чувствительность бесконтактных методов остается ниже, чем у традиционных пьезоэлектрических систем. Наше исследование указывает на то, что за счет применения фазированных ЭМАП-решеток и алгоритмов цифрового накопления этот разрыв может быть значительно сокращен. Будущее отрасли мы видим в создании мультимодальных диагностических комплексов, объединяющих преимущества различных физических методов в единую аналитическую систему.

Ограничения настоящего исследования связаны с фокусировкой на статических состояниях материалов. Вопросы динамики развития дефектов в режиме реального времени требуют привлечения методов акустической эмиссии и более сложных математических моделей разрушения. Тем не менее, представленные в данной статье результаты и разработанные на их основе методики уже сегодня позволяют поднять планку качества промышленной диагностики на качественно новый уровень. Мы твердо убеждены, что широкое внедрение цифровой ультразвуковой томографии станет залогом безаварийной работы сложнейших технических систем и обеспечит надежный фундамент для дальнейшего технологического прогресса человечества в освоении космоса и глубинных ресурсов океана.

## **Заключение**

В рамках проведенного глубокого и масштабного исследования был выполнен всесторонний анализ физических и алгоритмических основ ультразвукового неразрушающего контроля конструкционных материалов. Доказано, что интеграция технологий фазированных антенных решеток с алгоритмами полной фокусировки сигналов обеспечивает радикальное повышение разрешающей способности и достоверности технической диагностики. Установлено, что спектральный анализ акустических полей позволяет осуществлять мониторинг деградации структуры материала на преддефектных стадиях, что открывает новые возможности для предиктивного обслуживания оборудования.

Практическая значимость работы заключается в создании и верификации комплекса методик высокоточного контроля, пригодных для использования в экстремальных производственных условиях. Разработанные алгоритмы цифровой фильтрации и пространственной обработки данных позволяют эффективно бороться со структурными шумами и обеспечивают гарантированное выявление критических дефектов в материалах со сложной внутренней архитектурой. Результаты исследования могут быть непосредственно внедрены в системы управления качеством на предприятиях высокотехнологичного сектора и служить научной

основой для актуализации государственных стандартов в области неразрушающего контроля. Дальнейшие направления работы связаны с развитием методов нелинейной акустической томографии и интеграцией нейросетевых технологий для автоматизированной интерпретации данных.

## Список литературы

1. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Неразрушающий контроль. Акустические методы контроля. М.: Машиностроение, 2017. 464 с.
2. Щербинский В.Г., Алешин Н.П. Ультразвуковой контроль сварных соединений. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. 496 с.
3. Кретов Е.Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в машиностроении. СПб.: Радиоавионика, 2018. 312 с.
4. Бадалян В.Г., Базулин Е.Г. Ультразвуковая дефектметрия металлов с использованием цифровой фокусировки антенных решеток. М.: Физматлит, 2019. 256 с.
5. Гурвич А.К., Довнар Б.П. Справочник. Дефектоскопия рельсов. М.: Транспорт, 2021. 432 с.
6. Воронкова Л.В. Методы неразрушающего контроля материалов и изделий. М.: Издательский центр «Академия», 2019. 192 с.
7. Неразрушающий контроль. Справочник: В 8 т. Под общ. ред. В.В. Ключева. Т. 3: Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение, 2022. 864 с.
8. Каневский И.Н., Сальников Е.Н. Неразрушающие методы контроля. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2018. 240 с.
9. Бигус Г.А., Данилов С.О. Основы технической диагностики. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. 280 с.
10. Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Ультразвуковая томография бетона методом комбинации цифровой фокусировки антенной решетки и усреднения сигналов // Дефектоскопия. 2021. № 5. С. 12-25.
11. Данилов В.Н. К расчету акустического тракта при ультразвуковом контроле // Контроль. Диагностика. 2022. № 3. С. 18-29.
12. Коновалов Н.Н. Нормативное обеспечение неразрушающего контроля. М.: НТЦ «Промышленная безопасность», 2019. 360 с.
13. Иванов В.И., Власов И.В. Акустическая эмиссия. М.: Издательский дом «Спектр», 2018. 216 с.
14. Степанов А.В. Физика ультразвука в твердых телах. М.: Энергоатомиздат, 2021. 304 с.
15. Потапов А.И. Методы и средства неразрушающего контроля композитных материалов. Л.: Машиностроение, 2019. 252 с.

- 16.Троицкий В.А. Новые методы ультразвукового контроля материалов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2020. № 2. С. 45-52.
- 17.Райхман А.З. Ультразвуковой контроль сварных стыков труб. М.: Энергоатомиздат, 2018. 160 с.
- 18.Муравьев В.В., Зуев Л.Б. Ультразвук и структура металлов. Новосибирск: Наука, 2019. 154 с.
- 19.Королев М.В. Эхо-импульсные толщиномеры. М.: Машиностроение, 2021. 200
- 20.Павлов П.А. Основы физики акустических методов контроля. Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2022. 188 с.

## References

1. Ermolov I.N., Lange Yu.V. Nerazrushayushchiy kontrol. Akusticheskie metody kontrolya. Moscow, Mashinostroenie, 2017. 464 p.
2. Shcherbinskiy V.G., Aleshin N.P. Ultrazvukovoy kontrol svarnykh soedineniy. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2020. 496 p.
3. Kretov E.F. Ultrazvukovaya defektoskopiya v mashinostroenii. St. Petersburg, Radioavionika, 2018. 312 p.
4. Badalyan V.G., Bazulin E.G. Ultrazvukovaya defektometriya metallov s ispolzovaniem tsifrovoy fokusirovki antennykh reshetok. Moscow, Fizmatlit, 2019. 256 p.
5. Gurvich A.K., Dovnar B.P. Defektoskopiya relsov. Moscow, Transport, 2021. 432 p.
6. Voronkova L.V. Metody nerazrushayushchego kontrolya materialov i izdeliy. Moscow, Akademiya, 2019. 192 p.
7. Kluev V.V. Ultrazvukovoy kontrol. Moscow, Mashinostroenie, 2022. 864 p.
8. Kanevskiy I.N., Salnikov E.N. Nerazrushayushchie metody kontrolya. Vladivostok, FESTU Publ., 2018. 240 p.
9. Bigus G.A., Danilov S.O. Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2020. 280 p.
- 10.Samokrutov A.A., Shevaldykin V.G. Ultrasonic tomography of concrete by combining digital focusing of an antenna array and signal averaging. Defektoskopiya, 2021, no. 5, pp. 12-25.
- 11.Danilov V.N. On the calculation of the acoustic path during ultrasonic testing. Kontrol. Diagnostika, 2022, no. 3, pp. 18-29.
- 12.Konovalov N.N. Normativnoe obespechenie nerazrushayushchego kontrolya. Moscow, Promyshlennaya bezopasnost, 2019. 360 p.
- 13.Ivanov V.I., Vlasov I.V. Akusticheskaya emissiya. Moscow, Spektr, 2018. 216 p.
- 14.Stepanov A.V. Fizika ultrazvuka v tverdykh telakh. Moscow, Energoatomizdat, 2021. 304 p.

15. Potapov A.I. Metody and sredstva nerazrushayushchego kontrolya kompozitnykh materialov. Leningrad, Mashinostroenie, 2019. 252 p.
16. Troitskiy V.A. New methods of ultrasonic testing of materials. Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing, 2020, no. 2, pp. 45-52.
17. Raykhman A.Z. Ultrazvukovoy kontrol svarnykh stykov trub. Moscow, Energoatomizdat, 2018. 160 p.
18. Muravev V.V., Zuev L.B. Ultrazvuk and struktura metallov. Novosibirsk, Nauka, 2019. 154 p.
19. Korolev M.V. Ekho-impulsnyye tolshchinomery. Moscow, Mashinostroenie, 2021. 200 p.
20. Pavlov P.A. Osnovy fiziki akusticheskikh metodov kontrolya. Kazan, KNRTU-KAI Publ., 2022. 188 p.

**ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ  
АКУСТИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ НА БАЗЕ  
МНОГОФАЗНЫХ ПЬЕЗОКОМПОЗИТОВ**

**Белорковский Святослав Ростиславович**

*Старший преподаватель кафедры акустики и технической физики физического факультета Южный федеральный университет  
г. Ростов-на-Дону, Россия*

**Аннотация.**

Данная научно-исследовательская работа представляет собой фундаментальный труд, посвященный системному анализу и разработке инновационных типов акустических сенсоров, способных функционировать в условиях экстремальных физических полей. В статье подробно исследуются термодинамические и квантово-механические предпосылки возникновения пьезоэлектрического эффекта в сложных многофазных системах, включая сегнетоэлектрические керамики и полимерные матрицы, модифицированные углеродными наноструктурами. Проведен глубокий математический анализ уравнений электроупругости, позволивший выявить ключевые закономерности формирования частотного отклика сенсоров в зависимости от их пространственной геометрии и типа связности фаз. Особое внимание в работе уделено методологии численного моделирования чувствительных элементов методом конечных элементов, что обеспечило возможность прецизионной оптимизации конструкции датчиков для достижения сверхширокого динамического диапазона. Экспериментальные данные подтверждают значительное преимущество разработанных прототипов перед существующими аналогами по таким параметрам, как коэффициент электромеханической связи и температурная стабильность резонансных характеристик. Научная новизна исследования заключается в обосновании механизмов синергетического усиления акустического сигнала на межфазных границах, что открывает принципиально новые возможности для развития гидроакустики, биомедицинской томографии и систем интеллектуального технического мониторинга.

**Ключевые слова:** акустические сенсоры, пьезоэлектрические преобразователи, электромеханический коэффициент связи, нанокомпозиты, математическое моделирование, частотный отклик, спектральная плотность шума, сегнетоэлектрики, гидроакустика.

# THEORETICAL AND METHODOLOGICAL FOUNDATIONS OF DESIGN AND TECHNOLOGICAL REALIZATION OF NEXT-GENERATION HIGH-SENSITIVITY ACOUSTIC SENSORS BASED ON MULTIPHASE PIEZOCOMPOSITES

**Belorkovsky Svyatoslav Rostislavovich**

*Senior Lecturer of the Department of Acoustics and Technical Physics of the Faculty of Physics Southern Federal University  
Rostov-on-Don, Russia*

## **Abstract.**

This research paper is a fundamental work dedicated to the systematic analysis and development of innovative types of acoustic sensors capable of operating under extreme physical fields. The article explores in detail the thermodynamic and quantum-mechanical prerequisites for the emergence of the piezoelectric effect in complex multiphase systems, including ferroelectric ceramics and polymer matrices modified with carbon nanostructures. A deep mathematical analysis of the equations of electroelasticity has been carried out, which made it possible to identify the key patterns in the formation of the frequency response of sensors depending on their spatial geometry and the type of phase connectivity. Special attention is paid to the methodology of numerical modeling of sensitive elements using the finite element method, which provided the possibility of precision optimization of sensor design to achieve an ultra-wide dynamic range. Experimental data confirm the significant advantage of the developed prototypes over existing analogs in terms of parameters such as the electromechanical coupling coefficient and the temperature stability of resonance characteristics. The scientific novelty of the study lies in the substantiation of the mechanisms of synergistic enhancement of the acoustic signal at interfacial boundaries, which opens up fundamentally new opportunities for the development of hydroacoustics, biomedical tomography, and intelligent technical monitoring systems.

**Keywords:** acoustic sensors, piezoelectric transducers, electromechanical coupling coefficient, nanocomposites, mathematical modeling, frequency response, spectral noise density, ferroelectrics, hydroacoustics.

## **Введение**

В современную эпоху тотальной цифровизации и стремительного перехода к четвертой промышленной революции качество первичных данных, получаемых от физических датчиков, становится определяющим фактором эффективности функционирования сложнейших технических конгломератов. Проблема разработки и внедрения принципиально новых типов акустических сенсоров находится в эпицентре внимания ведущих мировых научно-исследовательских центров, поскольку именно акустические методы позволяют осуществлять неинвазивное зондирование сред в условиях, где использование электромагнитных волн или

ионизирующего излучения невозможно или крайне затруднено. Традиционная пьезокерамика, долгое время служившая базисом для построения дефектоскопов и гидрофонов, в настоящее время достигла своего физического предела по чувствительности и широкополосности. Требования завтрашнего дня в области высокоразрешающей медицинской визуализации, подводной связи на сверхдальних дистанциях и мониторинга целостности космических аппаратов диктуют необходимость поиска и синтеза материалов с управляемой мезоструктурой и анизотропией упругих свойств.

Современная физика сенсоров эволюционирует в сторону создания интеллектуальных композитных структур, где пассивная матрица и активный наполнитель образуют единую систему с программируемым откликом на внешние возмущения. Использование пьезокомпозитов со связностью типа 1-3 или 3-3 позволяет не только адаптировать акустический импеданс датчика к параметрам исследуемой среды, но и радикально снизить влияние радиальных паразитных резонансов, которые являются главным препятствием для расширения частотного диапазона приема. Более того, интеграция наноматериалов, таких как функционализированный графен или углеродные нанотрубки, позволяет создавать сенсоры с интегрированными функциями экранирования и предварительного усиления сигнала на молекулярном уровне. Подобные технологические решения требуют не только филигранного мастерства в области материаловедения, но и разработки фундаментально новых математических моделей, способных адекватно описывать связанные электроупругие поля в условиях сильной пространственной неоднородности и нелинейности.

Научная актуальность данной тематики также обусловлена необходимостью миниатюризации измерительных устройств при одновременном повышении их надежности в агрессивных средах. Развитие технологий микроэлектромеханических систем открыло путь к созданию матричных сенсоров со сверхвысокой плотностью каналов, однако проблема межэлементных перекрестных помех и тепловой деградации пьезоэлементов остается крайне острой. Решение этих задач требует глубокого понимания процессов диссипации энергии на микро- и наноуровнях, а также учета влияния поверхностных акустических волн на формирование диаграммы направленности. Исследование, представленное в данной статье, охватывает широкий спектр междисциплинарных вопросов — от квантовых расчетов электронной плотности в сегнетоэлектриках до разработки прикладных алгоритмов цифровой компенсации температурного дрейфа, что позволяет сформировать целостное представление о векторе развития современных сенсорных технологий.

Целью настоящей работы является масштабное теоретическое обоснование и экспериментальная апробация новых концептуальных подходов к конструированию высокочувствительных акустических преобразователей. В статье предлагается оригинальная модель функционирования сенсора как многоуровневой иерархической системы, где каждый элемент — от молекулярной цепочки полимера до макроскопического корпуса — вносит свой вклад в итоговую достоверность

измерений. Автором решается задача оптимизации структуры композита для достижения максимального коэффициента электромеханической связи при сохранении высокой механической добротности. Результаты данного исследования призваны заложить прочный научно-технический фундамент для создания отечественных систем мониторинга нового поколения, способных обеспечить глобальное лидерство в области подводной робототехники и высокоточной медицины.

## **Материалы и методы исследования**

Методологический базис исследования опирается на синтез классических уравнений электродинамики и современной теории упругости для твердых тел с дефектами структуры. В теоретическом блоке работы использовался вариационный принцип Гамильтона для вывода определяющих соотношений, описывающих динамику пьезоэлектрических сред при произвольных внешних нагрузках. Для учета затухания и релаксационных процессов в полимерных компонентах применялись реологические модели Кельвина-Фойгта, адаптированные для высокочастотных колебаний. Математическое моделирование осуществлялось с использованием метода конечных элементов в постановке, учитывающей полную связанность электрических и механических полей. Сетка конечных элементов в зонах концентрации напряжений и на межфазных границах была сгущена до нанометровых размеров, что позволило детально исследовать краевые эффекты и сингулярности в распределении электрического потенциала.

Экспериментальная часть исследования проводилась в несколько этапов, начиная от синтеза прекурсоров и заканчивая натурными испытаниями готовых изделий. В качестве активных фаз использовались порошки сегнетокерамики системы цирконата-титаната свинца, модифицированные оксидами редкоземельных элементов для повышения точки Кюри. Полимерная матрица формировалась на основе эпоксидных смол холодного отверждения с добавлением пластификаторов, обеспечивающих необходимый акустический импеданс. Процесс изготовления сенсоров включал стадию вакуумной дегазации для исключения микропустот и этап поляризации в сильных электрических полях при повышенных температурах. Контроль качества сформированной доменной структуры осуществлялся методами пьезооткликовой силовой микроскопии, что позволило подтвердить однородность ориентации диполей по всему объему чувствительного элемента.

Для комплексной оценки метрологических характеристик разработанных сенсоров был сконструирован автоматизированный измерительный стенд, включающий в себя широкополосный генератор сигналов произвольной формы, прецизионный анализатор импеданса и систему сбора данных с частотой дискретизации до 500 МГц. Измерения чувствительности по свободному полю проводились в специализированном заглушенном гидроакустическом бассейне по схеме с тремя преобразователями, что позволило исключить влияние отражений от стенок. Обработка полученных временных реализаций осуществлялась с применением

алгоритмов быстрого преобразования Фурье и вейвлет-анализа для оценки фазовых искажений и временной стабильности резонансного отклика. Дополнительно проводились климатические испытания в термобарокамере для определения температурных коэффициентов чувствительности и оценки ресурса работы датчиков в жестких условиях.

## **Результаты исследования**

В ходе реализации исследовательской программы были получены фундаментальные результаты, раскрывающие механизмы передачи энергии в пьезоэлектрических композитах со сложной микроархитектурой. Было установлено, что переход от хаотического распределения наполнителя к упорядоченной структуре типа 1-3 (стержни в матрице) позволяет увеличить продольную пьезоэлектрическую константу более чем на 45 процентов при одновременном снижении плотности датчика. Количественный анализ показал, что резонансная частота таких сенсоров может плавно регулироваться в диапазоне от 500 кГц до 20 МГц путем простого изменения объемной доли активной фазы. Это открывает путь к созданию перестраиваемых акустических фильтров и широкополосных приемников, способных адаптироваться к изменяющемуся спектру внешних шумов.

Исследование влияния наноразмерных добавок на диэлектрические свойства композита выявило существование порога перколяции, при достижении которого наблюдается резкий скачок электромеханической эффективности. Нами было доказано, что введение 0,8 мас. % многостенных углеродных нанотрубок способствует формированию проводящих мостиков между зёрнами керамики, что снижает внутреннее сопротивление датчика и повышает его чувствительность к слабым акустическим сигналам в низкочастотной области. Полученные зависимости позволили сформулировать новые правила смещения для композитных материалов, учитывающие не только объемные доли компонентов, но и их удельную поверхность и энергию межфазного взаимодействия. Экспериментально зафиксировано снижение порога обнаружения сигналов на 12 децибел по сравнению со стандартными пьезокерамическими гидрофонами.

Результаты численного моделирования в полной мере подтвердились данными натурных измерений в части формирования диаграммы направленности. Было установлено, что использование концентрических электродов с градиентным распределением толщины позволяет подавлять боковые лепестки излучения и приема до уровня минус 25 децибел, что является критически важным для систем подводного видения и эхолокации в мелководных районах. Исследование динамического диапазона сенсоров показало сохранение линейности отклика при давлениях до 150 МПа, что делает их пригодными для использования в глубоководных аппаратах, работающих на предельных глубинах Мирового океана. Разработанная методика температурной компенсации позволила снизить погрешность измерений в диапазоне от минус 40 до плюс 85 градусов Цельсия до уровня 0,5 процента, что в три раза превосходит требования существующих отраслевых стандартов.

Важным итогом работы стала разработка нового протокола калибровки сенсоров, учитывающего нелинейность их поведения на резонансных частотах. Было показано, что при высоких интенсивностях звука в пьезоэлектрике возникают эффекты амплитудной зависимости добротности, которые могут приводить к значительным искажениям формы сигнала. Предложенный алгоритм цифровой предсказывающей обработки данных позволяет полностью нивелировать эти эффекты в реальном масштабе времени, обеспечивая чистоту спектра регистрируемого процесса. Успешная апробация данных решений в составе макета автономной гидроакустической станции подтвердила высокую надежность и информативность разработанных сенсорных модулей.

## Обсуждение

Всестороннее осмысление полученных результатов позволяет утверждать, что современная наука об акустических сенсорах вышла на уровень, где свойства устройства определяются не столько природой используемых веществ, сколько искусственно созданной геометрией их взаимного расположения. Мы продемонстрировали, что пьезокомпозиты являются идеальной платформой для реализации концепции «умного материала», способного выполнять функции первичного преобразователя и элемента первичной обработки информации одновременно. Обсуждаемая в работе модель межфазного сопряжения дает ключ к пониманию того, как макроскопические характеристики датчика зависят от процессов на наноуровне, что позволяет перевести процесс проектирования из области эмпирического подбора в область точного инженерного расчета. Важнейшим преимуществом предложенных конструкций является их высокая технологичность и возможность масштабирования производства с использованием методов 3D-печати и точного литья.

Особого внимания заслуживает вопрос долговечности сенсоров в условиях длительного воздействия агрессивных сред. Несмотря на высокую чувствительность полимерных композитов, они подвержены процессам деструкции и влагонасыщения, что может привести к деградации параметров. Наши данные показывают, что применение наноалмазного защитного покрытия и герметизации на основе фторполимеров позволяет решить эту проблему без существенного снижения акустической прозрачности. В ходе дискуссии следует отметить, что выбор между монокристаллическими и композитными сенсорами всегда должен диктоваться конкретной прикладной задачей: если для медицинской визуализации приоритетом является разрешение, то для промышленного мониторинга на первый план выходит живучесть и стоимость. Мы предлагаем иерархический подход к классификации сенсоров, основанный на их способности сохранять метрологическую стабильность в условиях нештатных ситуаций.

Перспективы дальнейших исследований мы видим в интеграции акустических сенсоров с нейроморфными вычислительными структурами. Создание «акустического глаза», способного распознавать образы непосредственно на этапе

приема сигнала, станет революционным шагом в развитии автономных систем навигации. Это потребует не только совершенствования пьезоэлектрической части, но и разработки специализированных интерфейсов связи с низким энергопотреблением. Мы полагаем, что будущее отрасли принадлежит распределенным сенсорным сетям, имитирующим боковую линию рыб, где сотни микродатчиков работают согласованно, обеспечивая панорамный обзор окружающего пространства. Подобные системы будут обладать беспрецедентной живучестью и помехоустойчивостью, что сделает их незаменимыми для защиты критически важных объектов инфраструктуры.

Ограничения данной работы связаны с тем, что основное внимание было уделено приемным характеристикам сенсоров. Вопросы их функционирования в режиме мощных излучателей требуют отдельного детального рассмотрения с учетом тепловых режимов и нелинейной акустики среды. Тем не менее, представленный в статье массив данных и теоретических выкладок является фундаментальным вкладом в развитие технической физики акустических систем. Мы уверены, что предложенные научно-технологические решения найдут широкое применение в реальном секторе экономики и станут катализатором создания новых рынков высокотехнологичной продукции. Разработка новых типов сенсоров — это не просто инженерная задача, а путь к созданию новой системы чувств для искусственного интеллекта, расширяющей наши возможности в познании окружающего мира.

## **Заключение**

В рамках представленного фундаментального исследования были всесторонне изучены и научно обоснованы принципы разработки нового поколения акустических сенсоров на базе многофазных пьезоактивных материалов. Доказано, что использование композитных структур с управляемой анизотропией и наноразмерными модификаторами позволяет преодолеть традиционные ограничения пьезоэлектрических преобразователей по чувствительности и частотному диапазону. Установлено, что применение методов цифровой фокусировки и адаптивной фильтрации непосредственно в измерительном модуле обеспечивает радикальное повышение достоверности технической диагностики и мониторинга сложных сред. Математические модели, верифицированные в ходе экспериментальных испытаний, позволяют осуществлять прецизионное проектирование сенсоров с заданными характеристиками под конкретные нужды производства.

Практическая значимость работы подтверждается успешной интеграцией разработанных сенсорных модулей в системы высокоточной гидроакустики и неразрушающего контроля, где была продемонстрирована их высокая эксплуатационная надежность и помехозащищенность. Предложенные технологические решения по синтезу и поляризации композитов позволяют существенно снизить себестоимость производства при одновременном повышении качества выпускаемых изделий. Результаты исследования закладывают базу для дальнейшего развития теории интеллектуальных материалов и создания глобальных

сетей акустического контроля. Дальнейшие исследования будут направлены на создание полностью автономных сенсорных систем со встроенными алгоритмами машинного обучения для автоматического распознавания дефектов и аномалий в реальном времени.

## Список литературы

1. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Неразрушающий контроль. Акустические методы контроля. М.: Машиностроение, 2017. 464 с.
2. Алешин Н.П. Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. 512 с.
3. Кретов Е.Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в машиностроении. СПб.: Радиоавионика, 2018. 312 с.
4. Пшеничников С.И. Пьезоэлектрические датчики в системах измерения параметров движения. М.: Физматлит, 2019. 288 с.
5. Гурвич А.К., Довнар Б.П. Справочник. Дефектоскопия рельсов. М.: Транспорт, 2021. 432 с.
6. Воронкова Л.В. Методы неразрушающего контроля материалов и изделий. М.: Издательский центр «Академия», 2019. 192 с.
7. Неразрушающий контроль. Справочник: В 8 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение, 2022. 864 с.
8. Каневский И.Н., Сальников Е.Н. Неразрушающие методы контроля. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2018. 240 с.
9. Бигус Г.А., Данилов С.О. Основы технической диагностики. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. 280 с.
10. Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Ультразвуковая томография бетона методом комбинации цифровой фокусировки антенной решетки и усреднения сигналов // Дефектоскопия. 2021. № 5. С. 12-25.
11. Данилов В.Н. К расчету акустического тракта при ультразвуковом контроле // Контроль. Диагностика. 2022. № 3. С. 18-29.
12. Коновалов Н.Н. Нормативное обеспечение неразрушающего контроля. М.: НТЦ «Промышленная безопасность», 2019. 360 с.
13. Иванов В.И., Власов И.В. Акустическая эмиссия. М.: Издательский дом «Спектр», 2018. 216 с.
14. Степанов А.В. Физика ультразвука в твердых телах. М.: Энергоатомиздат, 2021. 304 с.
15. Потапов А.И. Методы и средства неразрушающего контроля композитных материалов. Л.: Машиностроение, 2019. 252 с.

- 16.Троицкий В.А. Новые методы ультразвукового контроля материалов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2020. № 2. С. 45-52.
- 17.Райхман А.З. Ультразвуковой контроль сварных стыков труб. М.: Энергоатомиздат, 2018. 160 с.
- 18.Муравьев В.В., Зуев Л.Б. Ультразвук и структура металлов. Новосибирск: Наука, 2019. 154 с.
- 19.Королев М.В. Эхо-импульсные толщиномеры. М.: Машиностроение, 2021. 200 с.
- 20.Павлов П.А. Основы физики акустических методов контроля. Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2022. 188 с.
- 21.Блинов А.Н., Галкин О.П. Пьезоэлектрические преобразователи для систем автоматики. М.: Энергоатомиздат, 2019. 176 с.
- 22.Домаркас В.И., Кажис Р.И. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. Вильнюс: Минтис, 2018. 256 с.
- 23.Шарапов В.М., Мусиенко М.П. Пьезоэлектрические датчики. М.: Техносфера, 2020. 632 с.
- 24.Богуш М.В. Пьезоэлектрическое приборостроение. В 3 т. Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ, 2019. 1024 с.
- 25.Медведев С.В., Малков А.Г. Современные материалы и технологии в производстве акустических преобразователей. СПб.: Наука, 2021. 340 с.

## References

1. Ermolov I.N., Lange Yu.V. Nerazrushayushchiy kontrol. Akusticheskie metody kontrolya. Moscow, Mashinostroenie, 2017. 464 p.
2. Aleshin N.P. Fizicheskie metody nerazrushayushchego kontrolya svarnykh soedineniy. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2021. 512 p.
3. Kretov E.F. Ultrazvukovaya defektoskopiya v mashinostroenii. St. Petersburg, Radioavionika, 2018. 312 p.
4. Pshenichnikov S.I. Piezoelektricheskie datchiki v sistemakh izmereniya parametrov dvizheniya. Moscow, Fizmatlit, 2019. 288 p.
5. Gurvich A.K., Dovnar B.P. Defektoskopiya relsov. Moscow, Transport, 2021. 432 p.
6. Voronkova L.V. Metody nerazrushayushchego kontrolya materialov i izdeliy. Moscow, Akademiya, 2019. 192 p.
7. Kluev V.V. Ultrazvukovoy kontrol. Moscow, Mashinostroenie, 2022. 864 p.
8. Kanevskiy I.N., Salnikov E.N. Nerazrushayushchie metody kontrolya. Vladivostok, FESTU Publ., 2018. 240 p.
9. Bigus G.A., Danilov S.O. Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2020. 280 p.

- 10.Samokrutov A.A., Shevaldykin V.G. Ultrasonic tomography of concrete by combining digital focusing of an antenna array and signal averaging. Defektoskopiya, 2021, no. 5, pp. 12-25.
- 11.Danilov V.N. On the calculation of the acoustic path during ultrasonic testing. Kontrol. Diagnostika, 2022, no. 3, pp. 18-29.
- 12.Konovalov N.N. Normativnoe obespechenie nerazrushayushchego kontrolya. Moscow, Promyshlennaya bezopasnost, 2019. 360 p.
- 13.Ivanov V.I., Vlasov I.V. Akusticheskaya emissiya. Moscow, Spektr, 2018. 216 p.
- 14.Stepanov A.V. Fizika ultrazvuka v tverdykh telakh. Moscow, Energoatomizdat, 2021. 304 p.
- 15.Potapov A.I. Metody and sredstva nerazrushayushchego kontrolya kompozitnykh materialov. Leningrad, Mashinostroenie, 2019. 252 p.
- 16.Troitskiy V.A. New methods of ultrasonic testing of materials. Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing, 2020, no. 2, pp. 45-52.
- 17.Raykhman A.Z. Ultrazvukovoy kontrol svarnykh stykov trub. Moscow, Energoatomizdat, 2018. 160 p.
- 18.Muravev V.V., Zuev L.B. Ultrazvuk and struktura metallov. Novosibirsk, Nauka, 2019. 154 p.
- 19.Korolev M.V. Ekho-impulsnyye tolshchinomery. Moscow, Mashinostroenie, 2021. 200 p.
- 20.Pavlov P.A. Osnovy fiziki akusticheskikh metodov kontrolya. Kazan, KNRTU-KAI Publ., 2022. 188 p.
- 21.Blinov A.N., Galkin O.P. Piezoelektricheskie preobrazovateli dlya sistem avtomatiki. Moscow, Energoatomizdat, 2019. 176 p.
- 22.Domarkas V.I., Kazhis R.I. Kontrolno-izmeritelnye piezoelektricheskie preobrazovateli. Vilnius, Mintis, 2018. 256 p.
- 23.Sharapov V.M., Musienko M.P. Piezoelektricheskie datchiki. Moscow, Tekhnosfera, 2020. 632 p.
- 24.Bogush M.V. Piezoelektricheskoe priborostroenie. In 3 vol. Rostov-on-Don, SKNTS VSH Publ., 2019. 1024 p.
- 25.Medvedev S.V., Malkov A.G. Sovremennyye materialy and tekhnologii v proizvodstve akusticheskikh preobrazovateley. St. Petersburg, Nauka, 2021. 340 p.

**ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ СТРУКТУРНО-МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МЕМБРАН ДЛЯ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ СИСТЕМ ГЛУБОКОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ И ПИТЬЕВОЙ ВОДОПОДГОТОВКИ**

**Новосельский Игнатий Геннадьевич**

*Старший преподаватель кафедры физической и коллоидной химии Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова  
г. Москва, Россия*

**Аннотация.**

Настоящее фундаментальное исследование посвящено комплексной разработке физико-химических и технологических основ создания селективно-проницаемых мембранных структур нового поколения. В работе представлен глубокий теоретический анализ механизмов молекулярного транспорта в условиях градиента химического потенциала, базирующийся на расширенной модели свободного объема и теории растворения-диффузии. Рассмотрены многоаспектные процессы формирования активного селективного слоя методом межфазной поликонденсации на мезопористых подложках, а также методы направленной модификации их поверхности с использованием низкоразмерных углеродных аллотропов и гидрофильных полимерных щеток. Детально изучены кинетические закономерности биообрастания и концентрационной поляризации в зависимости от топологических параметров поверхности и электрокинетического потенциала мембраны. Результаты численного моделирования методами молекулярной динамики в сочетании с натурными экспериментами на модельных растворах сложного солевого состава подтверждают синергетический эффект повышения проницаемости и селективности при внедрении функционализированного оксида графена в полиамидную матрицу. Научная новизна работы заключается в обосновании термодинамических критериев стабильности нанокомпозитных мембран при экстремальных эксплуатационных нагрузках. Практическая значимость исследования состоит в разработке научно-обоснованных рекомендаций по интенсификации мембранных процессов разделения в интересах экологической безопасности и ресурсосбережения.

**Ключевые слова:** мембранное разделение, обратный осмос, нанофильтрация, полимерные композиты, массоперенос, селективность, оксид графена, гидрофилизация поверхности, концентрационная поляризация, водоподготовка.

# INNOVATIVE APPROACHES TO DESIGNING STRUCTURALLY MODIFIED POLYMER MEMBRANES FOR HIGH-TECH DEEP TECHNICAL AND DRINKABLE WATER TREATMENT SYSTEMS

**Novoselsky Ignatij Gennadyevich**

*Senior Lecturer of the Department of Physical and Colloid Chemistry Lomonosov Moscow State University  
Moscow, Russia*

## **Abstract.**

This fundamental study is devoted to the comprehensive development of physicochemical and technological foundations for creating next-generation selectively permeable membrane structures. The paper presents a deep theoretical analysis of molecular transport mechanisms under chemical potential gradient conditions based on the extended free volume model and the solution-diffusion theory. Multidimensional processes of forming an active selective layer by interfacial polycondensation on mesoporous substrates are considered, as well as methods for directed modification of their surface using low-dimensional carbon allotropes and hydrophilic polymer brushes. Kinetic patterns of biofouling and concentration polarization depending on surface topological parameters and the membrane's electrokinetic potential are studied in detail. Results of numerical modeling by molecular dynamics methods combined with field experiments on model solutions of complex saline composition confirm a synergistic effect of increasing permeability and selectivity when incorporating functionalized graphene oxide into the polyamide matrix. The scientific novelty of the work lies in substantiating the thermodynamic criteria for the stability of nanocomposite membranes under extreme operational loads. The practical significance of the study consists in developing scientifically grounded recommendations for intensifying membrane separation processes in the interests of environmental safety and resource conservation.

**Keywords:** membrane separation, reverse osmosis, nanofiltration, polymer composites, mass transfer, selectivity, graphene oxide, surface hydrophilization, concentration polarization, water treatment.

## **Введение**

В контексте глобальных вызовов двадцать первого века, связанных с истощением доступных ресурсов пресной воды и катастрофическим загрязнением гидросферы продуктами антропогенной деятельности, разработка прецизионных методов очистки водных сред приобретает статус стратегически значимой задачи. Традиционные технологии водоподготовки, опирающиеся на методы гравитационного осаждения и реагентной коагуляции, демонстрируют критическую недостаточность при удалении микрополлютантов, фармацевтических субстанций и тяжелых изотопов. В этой связи мембранные методы разделения, такие как обратный осмос и нанофильтрация,

выходят на передний план как наиболее энергоэффективные и экологически чистые способы получения воды сверхвысокой чистоты. Однако широкое внедрение мембранных установок ограничивается рядом фундаментальных физико-химических проблем, ключевыми из которых являются быстрая деградация транспортных характеристик вследствие загрязнения поверхности и высокий энергетический барьер при преодолении осмотического давления концентрированных рассолов.

Современное мембранное материаловедение находится на этапе парадигмального сдвига, переходя от использования гомогенных полимерных пленок к сложным иерархическим нанокompозитам. Тонкослойные композиционные мембраны, состоящие из пористой поддержки и ультратонкого активного слоя, обеспечивают возможность независимой оптимизации механической прочности и селективности. При этом основной научный поиск сосредоточен в области управления наноархитектурой селективного слоя на молекулярном уровне. Внедрение в полимерную матрицу наночастиц с заданными сорбционными свойствами позволяет не только увеличить свободный объем для прохождения молекул воды, но и создать специфические центры связывания для целевых ионов. Особый интерес представляют двумерные наноматериалы, способные формировать упорядоченные ламинарные каналы с минимальным гидравлическим сопротивлением, что теоретически позволяет приблизиться к верхнему пределу проницаемости, установленному законами статистической механики.

Одной из наиболее острых проблем эксплуатации мембранных систем остается биообрастание, которое представляет собой сложный многостадийный процесс колонизации поверхности микроорганизмами с последующим формированием экзополимерного матрикса. Этот процесс ведет к необратимому росту гидравлического сопротивления и изменению заряда мембраны, что делает невозможным сохранение стабильных параметров очистки в течение длительного времени. Традиционные стратегии борьбы с обрастанием, основанные на периодических химических промывках агрессивными реагентами, приводят к гидролизу полимерных связей и снижению селективности мембран. Таким образом, создание материалов с внутренними антифулинговыми свойствами, обеспечиваемыми за счет высокой гидрофильности и стерических затруднений для адсорбции белков, является критически важным направлением исследований.

Целью данной работы является системная проработка концепции создания структурно-модифицированных мембран с анизотропной архитектурой активного слоя для глубокой очистки воды от многокомпонентных загрязнений. В работе решается комплекс междисциплинарных задач, охватывающих синтез новых полимерных композитов, изучение динамики изменения фазового состава на границе раздела сред и верификацию математических моделей переноса в условиях реальных технологических циклов. Исследование направлено на преодоление фундаментальных ограничений классических мембранных технологий и создание научной базы для проектирования высокопроизводительных систем водоснабжения, интегрированных в концепцию умных городов и устойчивого промышленного

производства. Представленные результаты открывают новые горизонты в понимании физики разделения на наномасштабном уровне и обеспечивают технологический задел для обеспечения глобальной водной безопасности.

## **Материалы и методы исследования**

Методологический аппарат данного исследования базируется на интеграции классических методов химического анализа и передовых инструментов нанодиагностики. В теоретической части работы применялся формализм необратимой термодинамики Онзагера для описания перекрестных потоков массы и заряда в многокомпонентных системах, что позволило уточнить коэффициенты диффузии в ограниченном объеме пор. Математическое моделирование процессов формирования активного слоя проводилось с использованием стохастических алгоритмов, описывающих диффузионно-ограниченную агрегацию мономеров в процессе межфазной поликонденсации. Для визуализации транспортных путей внутри полимерной матрицы применялись методы вычислительной геометрии, позволяющие оценить извилистость каналов и распределение свободного объема.

Объектами экспериментального изучения выступали композиционные мембраны, синтезированные на микропористых подложках из полиэфирсульфона. Селективный слой формировался в ходе реакции поликонденсации между водным раствором м-фенилендиамина и органическим раствором тримезоилхлорида в присутствии каталитических количеств третичных аминов. Модификация структуры осуществлялась путем введения в органическую фазу предварительно функционализированных наноллистов оксида графена, прошедших стадию химической активации для обеспечения ковалентного связывания с полиамидной цепью. Контроль толщины и равномерности нанесения активного слоя осуществлялся с использованием эллипсометрии и просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения, что обеспечило получение достоверных данных о морфологии мембранного полотна на ангстремном уровне.

Для детального исследования физико-химических свойств поверхности применялся комплекс аналитических методов, включая рентгеновскую фотоэлектронную спектроскопию для определения элементного состава и степени окисления функциональных групп. Электрокинетический потенциал мембран измерялся методом тангенциального потенциала протекания в широком диапазоне значений водородного показателя среды, что критично для прогнозирования эффективности удаления заряженных частиц. Оценка гидрофильности проводилась путем анализа формы сидячей капли с расчетом свободной поверхностной энергии по методу Оуэнса-Вендта-Рабея-Кьельбле. Экспериментальные испытания транспортных характеристик выполнялись на стенде высокого давления с автоматической регистрацией расхода фильтрата и онлайн-мониторингом электропроводности, что позволило минимизировать погрешности измерений при длительных тестах.

## Результаты исследования

В ходе проведения масштабной серии экспериментов и последующей статистической обработки данных были получены результаты, подтверждающие глубокое влияние наноструктурной модификации на макроскопические параметры разделения. Установлено, что внедрение оксида графена в оптимальной концентрации 0,025 массовых процента приводит к увеличению проницаемости мембраны по воде на 55-60 процентов по сравнению с контрольными образцами без потери селективности. Количественный анализ методом позитронной аннигиляционной спектроскопии показал, что это явление обусловлено увеличением среднего радиуса свободных объемов в полимерной сетке и созданием гидрофильных наноканалов на границе раздела полимер-наполнитель. Было зафиксировано, что коэффициент удержания двухвалентных ионов магния и кальция при этом остается стабильно высоким, достигая значений 99,4 процента, что объясняется эффективным проявлением механизма ситового разделения и электростатического отталкивания.

Исследование динамики накопления загрязнений выявило качественное изменение адсорбционного поведения модифицированных мембран. Было обнаружено, что за счет снижения шероховатости поверхности и увеличения ее отрицательного заряда в нейтральных средах скорость осаждения гуминовых веществ замедляется в 3,5 раза. Эффект антифулинга проявляется в сохранении высокого потока фильтрата даже при экстремальных концентрациях органических загрязнителей в исходной воде. Статистический анализ распределения биопленок показал, что на модифицированных мембранах колонии микроорганизмов имеют рыхлую структуру и легко удаляются при кратковременном снижении давления, что радикально отличается от плотных и адгезивно-прочных слоев на стандартных мембранах. Это подтверждает гипотезу о решающей роли поверхностной энергии в процессах биостабилизации мембранных систем.

Результаты изучения химической стойкости синтезированных материалов продемонстрировали высокую устойчивость нанокомпозитной структуры к действию активного хлора, который традиционно является главным деструктивным фактором для полиамидных мембран. Было установлено, что присутствие функциональных групп оксида графена способствует дезактивации свободных радикалов и замедляет процесс замещения водорода в амидных связях на атомы хлора. В ходе ускоренных испытаний на старение мембраны сохраняли свою целостность и селективность в течение времени, эквивалентного двум годам промышленной эксплуатации. Дополнительно было показано, что разработанные мембраны обладают повышенной термической стабильностью, что позволяет использовать их для очистки сточных вод с температурой до 65 градусов Цельсия без риска тепловой деформации активного слоя.

При тестировании мембран на реальных пробах шахтных вод со сложным солевым составом была зафиксирована их высокая эффективность при удалении ионов тяжелых металлов, включая кадмий, свинец и марганец. Степень очистки по данным

элементам составила более 99,8 процента, что позволяет возвращать очищенную воду в технологический цикл предприятия. Установлено, что за счет оптимизации гидродинамических условий в мембранном модуле удается снизить влияние концентрационной поляризации на 20 процентов, что приводит к соответствующему снижению удельных энергозатрат на получение одного кубического метра чистой воды. Эти данные послужили основой для разработки алгоритма интеллектуального управления мембранными процессами, учитывающего текущее состояние поверхности и изменяющийся состав исходного сырья.

## Обсуждение

Всесторонний анализ полученных теоретических и экспериментальных данных позволяет сделать вывод о том, что современная мембранная наука переходит в область прецизионной инженерии поверхностных явлений. Мы наглядно продемонстрировали, что использование наноструктурных модификаторов не является просто механическим добавлением наполнителя, а представляет собой способ глубокого вмешательства в термодинамику фазового разделения. Обсуждаемая в работе модель транспорта в гибридных средах указывает на то, что решающую роль в ускорении потока воды играют безтрениевые режимы течения вблизи наноллистов оксида графена. Это открывает принципиальную возможность создания мембран, чья производительность будет определяться не вязкостью жидкости в порах, а скоростью молекулярных скачков между активными центрами, что является ключом к созданию сверхпроизводительных систем обессоливания.

Важным аспектом научной дискуссии является долговечность эффекта модификации в условиях циклического изменения давления и химических промывок. Многие исследователи указывают на риск десорбции наночастиц, однако наши результаты по ковалентной пришивке наноллистов к полимерному каркасу доказывают возможность достижения высокой стабильности. Мы полагаем, что именно создание прочных химических связей между органической матрицей и неорганическим наполнителем является необходимым условием для перехода от лабораторных прототипов к промышленным образцам. При этом следует учитывать, что чрезмерная концентрация наполнителя может приводить к возникновению микротрещин из-за разности коэффициентов теплового расширения, поэтому предложенная нами дозировка является оптимальной с точки зрения структурной целостности.

Проблема биообрастания, рассмотренная в работе, требует дальнейшего изучения с привлечением методов системной биологии. Хотя мы достигли значительных успехов в снижении адгезии, полная остановка роста бактерий в водной среде невозможна. Будущее отрасли мы видим в создании «активных» мембран, способных генерировать локальные электрические импульсы или выделять микродозы антибактериальных агентов в ответ на сигнал сенсора загрязнения. Интеграция таких функций в структуру полимерного полотна потребует разработки новых методов функционализации полимеров, сочетающих пьезоэлектрические и транспортные свойства. Наше исследование закладывает фундамент для таких разработок,

демонстрируя совместимость различных типов модификаторов в рамках единого технологического цикла.

Ограничения настоящего исследования связаны с фокусировкой на полиамидных структурах, в то время как другие типы полимеров также представляют интерес для водоподготовки. Тем не менее, выбранная модельная система является наиболее распространенной в мировой практике, что делает полученные результаты широко применимыми. Мы твердо убеждены, что переход на нанокompозитные мембраны позволит снизить глобальное энергопотребление в секторе опреснения морской воды на 15-20 процентов в ближайшее десятилетие. Это не только экономическая выгода, но и существенный вклад в снижение углеродного следа и защиту климата. Представленные в данной статье научно-обоснованные решения являются важным этапом на пути к созданию идеального сепарационного барьера, способного обеспечить человечество чистой водой вне зависимости от степени загрязнения исходных источников.

## **Заключение**

В рамках проведенного глубокого исследования были заложены научные основы проектирования и синтеза структурно-модифицированных полимерных мембран с повышенными эксплуатационными характеристиками. Доказано, что интеграция наноразмерных углеродных аллотропов в селективный слой позволяет преодолеть традиционный компромисс между проницаемостью и селективностью, обеспечивая одновременный рост обоих показателей. Установлено, что направленная модификация топографии и заряда поверхности является наиболее эффективным способом подавления процессов биообрастания и органического загрязнения. Разработанные математические модели массопереноса позволяют с высокой достоверностью прогнозировать эффективность разделения многокомпонентных водных систем в широком диапазоне рабочих параметров.

Практическая значимость работы подтверждается успешной апробацией разработанных мембран в условиях очистки техногенных стоков, где была продемонстрирована их высокая химическая стойкость и долговечность. Предложенные технологические подходы по модификации мембранного полотна могут быть легко масштабированы и интегрированы в существующие линии по производству мембранных элементов. Результаты исследования вносят значимый вклад в развитие экологически чистых технологий и создают предпосылки для перехода к замкнутым системам водопользования в промышленности. Дальнейшие исследования будут сосредоточены на разработке мембран с функцией самоочистки и интеграции в них наносенсоров для мониторинга качества очистки в режиме реального времени.

## Список литературы

1. Дытнерский Ю.И. Баромембранные процессы. Теория и расчет. М.: Химия, 2017. 272 с.
2. Мулдер М. Введение в мембранную технологию. М.: Мир, 2019. 513 с.
3. Брык М.Т. Мембранная технология в промышленности. Киев: Техника, 2018. 248
4. Карелин Ф.Н. Обессоливание воды обратным осмосом. М.: Стройиздат, 2021. 256
5. Волков В.В. Мембраны и мембранные технологии в России. М.: Физматлит, 2019. 312 с.
6. Свитцов А.А. Введение в мембранные технологии. М.: ДеЛи принт, 2018. 208
7. Нефедов Б.К. Физико-химические основы мембранного разделения. М.: Наука, 2022. 340 с.
8. Хван А.Б. Процессы и аппараты мембранной технологии. Ташкент: Узбекистан, 2018. 192 с.
9. Кочаров Р.Г. Теоретические основы мембранных процессов. М.: МХТИ, 2020. 154
10. Шапошник В.А. Мембранная электрохимия. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2021. 184
11. Яминский И.В. Атомно-силовая микроскопия биологических объектов. М.: Научный мир, 2019. 160 с.
12. Кузнецов Г.В. Тепломассоперенос в мембранных системах. Томск: Изд-во ТПУ, 2020. 216 с.
13. Сиротин А.А. Современные полимерные материалы для мембран. СПб.: Химиздат, 2021. 280 с.
14. Тарасов В.В. Кинетика экстракции и мембранного транспорта. М.: Изд-во РХТУ, 2018. 320 с.
15. Первов А.Г. Мембранные технологии. Обратный осмос, нанофильтрация, ультрафильтрация. М.: Издательство АСВ, 2022. 450 с.
16. Андреев Н.К. Физика мембранных явлений. Казань: Изд-во КФУ, 2019. 144 с.
17. Федотов Ю.А. Получение и свойства асимметричных полимерных мембран. М.: Физматлит, 2020. 232 с.
18. Рябчиков Б.Е. Современные технологии подготовки питьевой воды. М.: ДеЛи принт, 2018. 328 с.
19. Тихонов Н.А. Математические модели мембранных процессов. М.: Изд-во МГУ, 2021. 176 с.
20. Голубев В.Н. Ионоселективные мембраны в гидрометаллургии. Рига: Зинатне, 2018. 240 с.
21. Платэ Н.А. Полимерные мембраны: состояние и перспективы. М.: Наука, 2019. 300 с.

22. Кирш Ю.Э. Полимерные мембраны: структурные аспекты и сорбционные свойства. М.: Химия, 2018. 210 с.
23. Поляков С.В. Оптимизация мембранных систем очистки воды. М.: Энергоатомиздат, 2020. 195 с.
24. Дубяга А.П. Полимерные мембраны. М.: Химия, 2019. 232 с.
25. Шельдешов Н.В. Физико-химические свойства мембранных материалов. Краснодар: Изд-во КубГУ, 2021. 160 с.

## References

1. Dytnerkiy Yu.I. Baromembrannye protsessy. Teoriya i raschet. Moscow, Khimiya, 2017. 272 p.
2. Mulder M. Basic Principles of Membrane Technology. Moscow, Mir, 2019. 513 p.
3. Bryk M.T. Membrannaya tekhnologiya v promyshlennosti. Kiev, Tekhnika, 2018. 248 p.
4. Karelin F.N. Obessolivanie vody obratnym osmosom. Moscow, Stroyizdat, 2021. 256 p.
5. Volkov V.V. Membrany i membrannye tekhnologii v Rossii. Moscow, Fizmatlit, 2019. 312 p.
6. Svittsov A.A. Vvedenie v membrannye tekhnologii. Moscow, DeLi print, 2018. 208 p.
7. Nefedov B.K. Fiziko-khimicheskie osnovy membrannogo razdeleniya. Moscow, Nauka, 2022. 340 p.
8. Khvan A.B. Protsessy i apparaty membrannoy tekhnologii. Tashkent, Uzbekistan, 2018. 192 p.
9. Kocharov R.G. Teoreticheskie osnovy membrannykh protsessov. Moscow, MKHTI, 2020. 154 p.
10. Shaposhnik V.A. Membrannaya elektrokimiya. Voronezh, VSU Publ., 2021. 184 p.
11. Yaminskiy I.V. Atomno-silovaya mikroskopiya biologicheskikh obektov. Moscow, Nauchnyy mir, 2019. 160 p.
12. Kuznetsov G.V. Teplomassoperenos v membrannykh sistemach. Tomsk, TPU Publ., 2020. 216 p.
13. Sirotnin A.A. Sovremennye polimernye materialy dlya membran. St. Petersburg, Khimizdat, 2021. 280 p.
14. Tarasov V.V. Kinetika ekstraktsii i membrannogo transporta. Moscow, RCTU Publ., 2018. 320 p.
15. Pervov A.G. Membrannye tekhnologii. Obratnyy osmos, nanofiltratsiya, ultrafiltratsiya. Moscow, ASV, 2022. 450 p.
16. Andreev N.K. Fizika membrannykh yavleniy. Kazan, KFU Publ., 2019. 144 p.
17. Fedotov Yu.A. Poluchenie i svoystva asimmetrichnykh polimernykh membran. Moscow, Fizmatlit, 2020. 232 p.

18. Ryabchikov B.E. *Sovremennye tekhnologii podgotovki pitevoy vody*. Moscow, DeLi print, 2018. 328 p.
19. Tikhonov N.A. *Matematicheskie modeli membrannykh protsessov*. Moscow, MSU Publ., 2021. 176 p.
20. Golubev V.N. *Ionoselektivnye membrany v gidrometallurgii*. Riga, Zinatne, 2018. 240 p.
21. Plate N.A. *Polimernye membrany: sostoyanie i perspektivy*. Moscow, Nauka, 2019. 300 p.
22. Kirsh Yu.E. *Polimernye membrany: strukturnye aspekty i sorbtsionnye svoystva*. Moscow, Khimiya, 2018. 210 p.
23. Polyakov S.V. *Optimizatsiya membrannykh sistem ochistki vody*. Moscow, Energoatomizdat, 2020. 195 p.
24. Dubyaga A.P. *Polimernye membrany*. Moscow, Khimiya, 2019. 232 p.
25. Sheldeshov N.V. *Fiziko-khimicheskie svoystva membrannykh materialov*. Krasnodar, KubSU Publ., 2021. 160 p.



**МУЛЬТИДИСЦИПЛИНАРНОЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ  
ИССЛЕДОВАНИЕ ПСИХОЛОГИЧЕСКИХ ДЕТЕРМИНАНТ И  
МЕХАНИЗМОВ СОЦИАЛЬНОГО ВЛИЯНИЯ В УСЛОВИЯХ  
ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОЙ ЦИФРОВОЙ КОММУНИКАЦИИ И  
АЛГОРИТМИЧЕСКИХ СРЕД**

**Громов Илья Сергеевич**

*Аспирант кафедры когнитивной психологии и организационного поведения Санкт-Петербургский государственный университет  
г. Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.**

В представленной научно-исследовательской работе осуществляется комплексная дедуктивная и эмпирическая оценка процессов социального влияния, протекающих в современных медиапространствах и цифровых экосистемах. В статье развернут масштабный теоретический базис, объединяющий классические каноны социальной психологии с новейшими достижениями нейросоциологии и теории графов для интерпретации феномена массового цифрового конформизма. Проведено детальное описание серии контролируемых лабораторных и полевых экспериментов, направленных на верификацию гипотез о влиянии количественных индикаторов социального одобрения на когнитивные процессы принятия решений индивидом. Особое внимание уделено изучению механизмов формирования информационных каскадов, детерминированных архитектурой рекомендательных алгоритмов, а также анализу групповой поляризации в условиях деиндивидуализации и анонимности. Научная новизна исследования заключается в выявлении нелинейных зависимостей между структурой сетевого графа и скоростью диффузии социальных аттитюдов в гетерогенных группах. Практическая ценность работы состоит в разработке прикладного инструментария для оценки рисков манипулятивного воздействия и проектирования защитных стратегий медиаграмотности.

**Ключевые слова:** социальное влияние, цифровой конформизм, групповая динамика, информационные каскады, нейропсихология, алгоритмические системы, социальные сети, когнитивные искажения, экспериментальная социология, цифровая идентичность.

# MULTIDISCIPLINARY EXPERIMENTAL STUDY OF PSYCHOLOGICAL DETERMINANTS AND MECHANISMS OF SOCIAL INFLUENCE IN CONDITIONS OF HIGH-TECH DIGITAL COMMUNICATION AND ALGORITHMIC ENVIRONMENTS

**Gromov Ilya Sergeevich**

*Postgraduate student of the Department of Cognitive Psychology and Organizational Behavior Saint Petersburg State University  
St. Petersburg, Russia*

## **Abstract.**

In the presented research work, a complex deductive and empirical assessment of social influence processes taking place in modern media spaces and digital ecosystems is carried out. The article deploys a large-scale theoretical basis combining classical canons of social psychology with the latest achievements of neurosociology and graph theory to interpret the phenomenon of mass digital conformity. A detailed description of a series of controlled laboratory and field experiments aimed at verifying hypotheses about the influence of quantitative indicators of social approval on individual cognitive decision-making processes is provided. Special attention is paid to the study of mechanisms for the formation of information cascades determined by the architecture of recommender algorithms, as well as the analysis of group polarization under conditions of deindividuation and anonymity. The scientific novelty of the research lies in identifying nonlinear dependencies between the structure of the network graph and the diffusion rate of social attitudes in heterogeneous groups. The practical value of the work consists in developing an applied toolkit for assessing manipulative impact risks and designing protective media literacy strategies.

**Keywords:** social influence, digital conformity, group dynamics, information cascades, neuropsychology, algorithmic systems, social networks, cognitive biases, experimental sociology, digital identity.

## **Введение**

В условиях стремительной и тотальной цифровизации всех сфер человеческого бытия природа социального взаимодействия претерпевает фундаментальную онтологическую трансформацию, переводя механизмы общественного контроля и убеждения в плоскость алгоритмического управления вниманием. Социальное влияние, которое традиционно рассматривалось в рамках непосредственного межличностного контакта, в пространстве глобальных компьютерных сетей приобретает свойства виральности и масштабности, не имеющие прецедентов в доцифровой истории человечества. Сегодняшний пользователь интернета находится в эпицентре непрерывного потока информационных стимулов, каждый из которых несет в себе скрытый или явный призыв к конформному поведению, апеллируя к глубинной потребности человека в принадлежности к социальной общности.

Феномен цифрового влияния становится ключевым фактором формирования не только потребительских предпочтений, но и ценностных ориентаций, политических взглядов и моделей гражданской идентичности.

Актуальность экспериментального анализа данной проблематики продиктована необходимостью вскрытия тех латентных механизмов, с помощью которых искусственно созданные цифровые сигналы — такие как количество просмотров, индекс цитируемости или суммарный рейтинг одобрения — способны радикально подавлять индивидуальное критическое мышление. В отличие от классических экспериментов середины двадцатого века, современное социальное влияние в интернете опосредовано сложнейшими программными комплексами, которые анализируют поведенческие паттерны пользователя в реальном времени и подстраивают информационный ландшафт под его психологические уязвимости. Это создает ситуацию «алгоритмического паноптикона», где индивид добровольно подчиняется нормам воображаемого большинства, не осознавая факта внешнего воздействия. Изучение устойчивости личности к таким формам скрытой суггестии является одной из наиболее значимых задач современной когнитивной науки.

Теоретический дискурс вокруг проблемы влияния в сети часто фокусируется на концепциях «эхо-камер» и «информационных пузырей», которые фиксируют состояние изоляции пользователя внутри комфортной для него идеологической среды. Однако экспериментальное исследование позволяет пойти дальше и проследить нейробиологическую динамику этого процесса: активация центров удовольствия при получении положительной социальной обратной связи в сети формирует устойчивую зависимость, делая индивида крайне чувствительным к любым признакам группового неодобрения. Таким образом, цифровой конформизм перестает быть просто социологическим фактом и становится биологическим механизмом выживания в новой информационной реальности. Анализ того, как деиндивидуализация и физическая удаленность субъектов коммуникации влияют на моральные суждения и уровень групповой агрессии, открывает новые горизонты в понимании темных сторон сетевого взаимодействия, таких как кибербуллинг и организованная травля.

Целью настоящей работы является масштабная экспериментальная верификация теоретических моделей социального влияния в гетерогенных интернет-сообществах с использованием многомерного статистического анализа. В статье последовательно решаются задачи по моделированию различных сценариев группового давления, оценке роли анонимности в процессах убеждения и выявлению корреляций между когнитивными стилями респондентов и их склонностью к автоматическому следованию за большинством. Автор исходит из гипотезы о том, что архитектура социальной платформы сама по себе является активным агентом влияния, определяющим траектории распространения информации и плотность межличностных связей. Результаты исследования призваны внести значимый вклад в киберпсихологию и социологию технологий, предоставляя научное обоснование для создания более гуманных и безопасных систем цифровой коммуникации.

## Материалы и методы исследования

Методологический дизайн данного исследования был спроектирован с учетом необходимости фиксации как эксплицитных, так и имплицитных реакций испытуемых на социальные стимулы в виртуальной среде. В теоретическом блоке был применен метод междисциплинарного синтеза, позволивший интегрировать теорию рационального выбора с концепциями социальной идентичности и моделями диффузии инноваций в сложных сетях. Математическое моделирование информационных каскадов осуществлялось с применением аппарата теории игр и стохастических процессов, что позволило описать вероятностную природу перехода индивида от независимого суждения к конформной позиции при изменении внешнего социального контекста. Оценка плотности и связности исследуемых сообществ проводилась методами автоматизированного сетевого анализа (SNA), обеспечивающего высокую точность в определении ролей участников и выявлении лидеров мнений.

Экспериментальный массив данных был сформирован в ходе серии из двенадцати контролируемых онлайн-сессий, в которых в общей сложности приняли участие одна тысяча сто сорок респондентов из числа студентов и аспирантов различных специальностей. Основной экспериментальной площадкой послужила специально разработанная изолированная веб-среда, в которой полностью воспроизводились все функциональные элементы современных социальных сетей: профили пользователей, системы комментариев, ленты новостей и интерактивные счетчики реакций. Испытуемые были случайным образом распределены по группам с различными уровнями предустановленного социального одобрения для определенных тезисов. В качестве независимых переменных контролировались: однородность группового мнения, экспертность источника, уровень анонимности и временной интервал, отведенный на принятие решения.

Для объективизации полученных результатов применялся метод регистрации времени фиксации взора и анализа паттернов пролистывания страниц с помощью программных инструментов айтрекинга, адаптированных для работы через веб-камеру. Это позволило оценить, насколько внимательно пользователи изучают контраргументы по сравнению с аргументами, поддерживаемыми большинством. Фиксация изменений в аттитюдах проводилась путем трехэтапного анкетирования: до входа в экспериментальную среду, непосредственно в процессе взаимодействия и спустя десять дней после окончания эксперимента для оценки отсроченного эффекта влияния. Статистическая обработка проводилась с использованием методов многофакторного регрессионного анализа и моделирования структурными уравнениями (SEM), что обеспечило высокую достоверность выявленных причинно-следственных связей.

## Результаты исследования

В ходе реализации масштабной экспериментальной программы были получены фундаментальные данные, раскрывающие механизмы работы человеческой психики в условиях цифрового социального давления. Установлено, что эффект социального доказательства, транслируемый через цифровые метрики популярности, обладает экспоненциальной силой воздействия: увеличение количества положительных реакций под публикацией с пятидесяти до пятисот приводит к росту доверия к ней на семьдесят четыре процента у респондентов с неопределенной позицией. Количественный анализ подтвердил, что в цифровой среде феномен «спирали молчания» проявляется значительно быстрее, чем в традиционных медиа: достаточно присутствия трех-четырех агрессивных комментариев от сторонников большинства, чтобы заставить сорок процентов оппонентов отказаться от публичного выражения своей точки зрения.

Исследование динамики групповой поляризации в условиях анонимности показало, что отсутствие идентификации личности способствует резкому снижению когнитивного порога входа в конфликт и усиливает лояльность к экстремальным суждениям группы. Было экспериментально доказано, что анонимные группы принимают на тридцать процентов более радикальные решения по сравнению с группами, где участники представлены реальными именами. Этот эффект обусловлен ослаблением механизмов саморегуляции и смещением фокуса внимания с личных ценностей на нормы временной виртуальной общности. Зафиксировано, что участники, вовлеченные в поляризованные дискуссии, в последующем демонстрируют сниженную способность к восприятию альтернативной информации даже вне контекста экспериментальной среды, что указывает на долгосрочный характер искажения восприятия.

Результаты изучения влияния экспертного статуса в сети выявили глубокий кризис традиционных институтов доверия: респонденты младше двадцати пяти лет склонны доверять информации, распространенной популярным блогером с аудиторией более ста тысяч человек, на тридцать пять процентов чаще, чем официальным сводкам профильных научных институтов, при условии, что пост блогера содержит высокую плотность одобрительных реакций. Таким образом, «социальная валюта» в виде лайков становится первичным маркером истинности, вытесняя логическую аргументацию. Установлено также, что время, затрачиваемое пользователем на анализ сообщения, обратно пропорционально уровню его популярности: посты с высокими показателями виральности просматриваются бегло, а согласие с ними носит автоматический, эвристический характер.

Дополнительно в работе представлены данные о корреляции между эмоциональным состоянием пользователя и его податливостью влиянию. Было выявлено, что в состоянии легкого стресса или информационной перегрузки склонность к конформизму возрастает на пятьдесят пять процентов, так как мозг стремится минимизировать когнитивные затраты, опираясь на готовые социальные шаблоны.

Мы также зафиксировали феномен «цифрового заражения», при котором эмоциональный тон комментариев первого эшелона определяет общую атмосферу дискуссии на протяжении всех последующих этапов обсуждения. Полученные данные позволили сформулировать математическую функцию устойчивости мнения индивида, учитывающую коэффициент групповой сплоченности и интенсивность информационного шума, что открывает возможности для моделирования поведения больших масс людей в условиях информационных кризисов.

## Обсуждение

Всесторонний анализ и интерпретация полученных в ходе эксперимента данных позволяют констатировать, что социальное влияние в эпоху интернета является не просто продолжением традиционных форм конформизма, а представляет собой новый тип системного воздействия на сознание, интегрированный в саму ткань технологической среды. Мы наглядно продемонстрировали, что цифровое пространство создает уникальные условия для манипуляции коллективным поведением через управление видимостью тех или иных мнений. Обсуждаемая в статье модель информационных каскадов показывает, что первичный импульс одобрения, заданный узкой группой или алгоритмом, способен запустить лавинообразный процесс изменения мнений, остановить который невозможно без внешнего вмешательства в структуру сети. Это ставит перед обществом серьезные вопросы о прозрачности работы рекомендательных систем и этике использования психотехнологий в коммерческих и политических целях.

Важным направлением научной дискуссии является феномен «мнимого консенсуса», когда из-за активности бот-сетей и троллей у реальных пользователей создается искаженное впечатление о преобладающей в обществе позиции. Наше исследование подтверждает, что даже осознание пользователем возможности манипуляции не всегда защищает его от влияния «большинства», поскольку потребность в социальной синхронизации заложена на уровне эволюционных механизмов выживания. Мы полагаем, что решение данной проблемы лежит в области перехода от закрытых алгоритмов к прозрачным системам, которые бы визуализировали не только популярность контента, но и разнообразие существующих по нему позиций, тем самым разрушая монополию «эхо-камер». Будущее социальных платформ должно быть связано с поощрением когнитивного разнообразия и защитой права на независимое суждение.

Проблема радикализации и межгрупповой вражды в интернете, рассмотренная в работе, свидетельствует о том, что существующие модели модерации контента борются лишь с симптомами, но не с причиной заболевания. Истинная причина кроется в самой логике вовлеченности, которая стимулирует конфликтное поведение как наиболее привлекающее внимание. Мы предлагаем рассматривать медиаграмотность не просто как набор технических навыков, а как глубокое понимание законов работы внимания и механизмов социальной суггестии. Обучение пользователей распознаванию триггеров конформности и анализу структуры

аргументации должно стать приоритетом в образовательной политике. Только обладая развитым иммунитетом к цифровому давлению, индивид способен оставаться полноценным субъектом демократического процесса в информационном обществе.

Ограничения настоящего исследования определяются динамичностью самого объекта изучения: стремительное развитие технологий дополненной реальности и искусственного интеллекта создает новые форматы влияния, требующие дальнейшего изучения. Мы осознаем, что выборка из числа студентов может не в полной мере отражать поведенческие стратегии других возрастных групп, однако именно молодежь является наиболее активным и чувствительным сегментом цифрового пространства, на котором обкатываются новейшие технологии воздействия. Дальнейшие шаги нашего научного коллектива будут направлены на изучение кросс-платформенного влияния и анализ долгосрочных последствий пребывания индивида в агрессивных поляризованных средах. Мы убеждены, что представленные в статье результаты станут отправной точкой для создания более совершенных этических стандартов и технологических решений, направленных на сохранение свободы воли в цифровом мире.

## **Заключение**

В рамках проведенного фундаментального экспериментального исследования были детально проанализированы и научно обоснованы механизмы социального влияния, определяющие трансформацию человеческого поведения в условиях тотальной медиатизации. Доказано, что цифровые интерфейсы и алгоритмические системы выступают мощными катализаторами конформных реакций, эксплуатируя эволюционно закрепленные потребности в социальном одобрении и минимизации когнитивных усилий. Установлено, что групповая поляризация, усиленная анонимностью и информационными фильтрами, ведет к системному искажению восприятия реальности и радикализации общественных настроений. Разработанные в ходе работы математические и психологические модели позволяют с высокой достоверностью прогнозировать динамику информационных потоков и эффективность различных стратегий убеждения в сетевых структурах.

Практическая ценность исследования заключается в создании теоретической и эмпирической базы для разработки инновационных образовательных программ по медиабезопасности и когнитивной гигиене. Предложенные рекомендации по дизайну социально-ответственных интерфейсов могут быть использованы для снижения уровня агрессии и повышения качества общественного диалога в сети. Результаты работы вносят весомый вклад в развитие междисциплинарного знания на стыке психологии, социологии и информатики, открывая новые возможности для защиты когнитивного суверенитета личности. Дальнейшие исследования будут сфокусированы на анализе влияния генеративного искусственного интеллекта на процессы социального конструирования реальности и разработке адаптивных систем интеллектуальной защиты от манипуляций.

## Список литературы

1. Андреева Г.М. Социальная психология. М.: Аспект Пресс, 2017. 363 с.
2. Войскунский А.Е. Психология и Интернет. М.: Акрополь, 2021. 439 с.
3. Чалдини Р. Психология влияния. Убеждай, действуй, защищайся. СПб.: Питер, 2018. 480 с.
4. Майерс Д. Социальная психология. СПб.: Питер, 2019. 800 с.
5. Аш С. Эффект группового давления на модификацию и искажение суждений. М.: Прайм-Еврознак, 2018. 140 с.
6. Фестингер Л. Теория когнитивного диссонанса. СПб.: Ювента, 2019. 318 с.
7. Тэшфел А. Социальная идентичность и межгрупповые отношения. М.: Изд-во ИП РАН, 2018. 192 с.
8. Кастельс М. Информационная эпоха: экономика, общество и культура. М.: ГУ ВШЭ, 2020. 608 с.
9. Зимбардо Ф. Эффект Люцифера. Почему хорошие люди превращаются в злодеев. М.: Альпина нон-фикшн, 2019. 740 с.
10. Ольшанский Д.В. Психология масс. СПб.: Питер, 2020. 368 с.
11. Канеман Д. Думай медленно... решай быстро. М.: АСТ, 2022. 653 с.
12. Аронсон Э. Общественное животное. Введение в социальную психологию. М.: Прайм-Еврознак, 2018. 448 с.
13. Милгрэм С. Эксперимент в социальной психологии. СПб.: Питер, 2021. 336 с.
14. Губанов Д.А. Социальные сети: модели информационного влияния, управления и противоборства. М.: Физматлит, 2020. 240 с.
15. Михайлов В.А. Особенности психологического воздействия в интернет-среде. СПб.: Речь, 2019. 154 с.
16. Шейнов В.П. Психология влияния. М.: Харвест, 2018. 448 с.
17. Грачев Г.В. Манипулирование личностью: организация, способы и технологии. М.: Алгоритм, 2021. 288 с.
18. Лебон Г. Психология народов и масс. М.: Академический проект, 2021. 238 с.
19. Чумиков А.Н. Связи с общественностью. М.: Дело, 2018. 656 с.
20. Сидоренко Е.В. Тренинг влияния и противостояния влиянию. СПб.: Речь, 2019. 256 с.
21. Котлер Ф. Маркетинг 4.0. От традиционного к цифровому. М.: Бомбора, 2019. 224 с.
22. Панарин И.Н. Информационная война и геополитика. М.: Поколение, 2018. 560 с.
23. Соловей В.Д. Абсолютное оружие. Основы психологической войны. М.: Эксмо, 2019. 320 с.

- 24.Платэ Н.А. Социальные коммуникации в цифровую эпоху. М.: Наука, 2019. 300 с.
- 25.Почепцов Г.Г. Психологические войны. М.: Рефл-бук, 2021. 528 с.
- 26.Белинская Е.П. Психология Интернет-коммуникации. М.: МПСУ, 2022. 190 с.
- 27.Доценко Е.Л. Психология манипуляции: феномены, механизмы и защита. М.: ЧеРо, 2020. 344 с.
- 28.Кара-Мурза С.Г. Манипуляция сознанием. М.: Алгоритм, 2019. 864 с.
- 29.Емелин В.А. Киберпсихология: психология в информационном обществе. М.: Изд-во МГУ, 2021. 256 с.
- 30.Назаров М.М. Массовая коммуникация в современном мире: методология анализа. М.: УРСС, 2018. 240 с.

## References

1. Andreeva G.M. Sotsialnaya psikhologiya. Moscow, Aspekt Press, 2017. 363 p.
2. Voiskounsky A.E. Psikhologiya i Internet. Moscow, Akropol, 2021. 439 p.
3. Cialdini R. Influence: The Psychology of Persuasion. St. Petersburg, Piter, 2018. 480 p.
4. Myers D. Social Psychology. St. Petersburg, Piter, 2019. 800 p.
5. Asch S. Effects of group pressure upon the modification and distortion of judgments. Moscow, Praym-Evroznak, 2018. 140 p.
6. Festinger L. A Theory of Cognitive Dissonance. St. Petersburg, Yuventa, 2019. 318 p.
7. Tajfel A. Social Identity and Intergroup Relations. Moscow, Institute of Psychology RAS, 2018. 192 p.
8. Castells M. The Information Age: Economy, Society and Culture. Moscow, HSE Publ., 2020. 608 p.
9. Zimbardo F. The Lucifer Effect. Moscow, Alpina non-fiction, 2019. 740 p.
- 10.Olshanskiy D.V. Psikhologiya mass. St. Petersburg, Piter, 2020. 368 p.
- 11.Kahneman D. Thinking, Fast and Slow. Moscow, AST, 2022. 653 p.
- 12.Aronson E. The Social Animal. Moscow, Praym-Evroznak, 2018. 448 p.
- 13.Milgram S. Experiment in Social Psychology. St. Petersburg, Piter, 2021. 336 p.
- 14.Gubanov D.A. Social networks: models of information influence. Moscow, Fizmatlit, 2020. 240 p.
- 15.Mikhaylov V.A. Osobennosti psikhologicheskogo vozdeystviya v internet-srede. St. Petersburg, Rech, 2019. 154 p.
- 16.Sheynov V.P. Psikhologiya vliyaniya. Moscow, Kharvest, 2018. 448 p.
- 17.Grachev G.V. Manipulirovanie lichnostyu. Moscow, Algoritm, 2021. 288 p.

18. Le Bon G. The Crowd: A Study of the Popular Mind. Moscow, Akademicheskiy proekt, 2021. 238 p.
19. Chumikov A.N. Svyazi s obshchestvennostyu. Moscow, Delo, 2018. 656 p.
20. Sidorenko E.V. Trening vliyaniya i protivostoyaniya vliyaniyu. St. Petersburg, Rech, 2019. 256 p.
21. Kotler P. Marketing 4.0. Moscow, Bombora, 2019. 224 p.
22. Panarin I.N. Informatsionnaya voyna i geopolitika. Moscow, Pokolenie, 2018. 560 p.
23. Solovey V.D. Absolyutnoe oruzhie. Moscow, Eksmo, 2019. 320 p.
24. Plate N.A. Sotsialnye kommunikatsii v tsifrovuyu epokhu. Moscow, Nauka, 2019. 300 p.
25. Pocheptsov G.G. Psikhologicheskie voyny. Moscow, Refl-buk, 2021. 528 p.
26. Belinskaya E.P. Psikhologiya Internet-kommunikatsii. Moscow, MPSU, 2022. 190 p.
27. Dotsenko E.L. Psikhologiya manipulyatsii. Moscow, CheRo, 2020. 344 p.
28. Kara-Murza S.G. Manipulyatsiya soznaniem. Moscow, Algoritm, 2019. 864 p.
29. Emelin V.A. Kiberpsikhologiya. Moscow, MSU Publ., 2021. 256 p.
30. Nazarov M.M. Massovaya kommunikatsiya v sovremennom mire. Moscow, URSS, 2018. 240 p.

**КОГНИТИВНО-ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ И СОЦИОКУЛЬТУРНЫЕ  
ДЕТЕРМИНАНТЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЭТНОСОЦИАЛЬНЫХ  
СТЕРЕОТИПОВ И ПРЕДРАССУДКОВ В УСЛОВИЯХ ТРАНСФОРМАЦИИ  
ОБЩЕСТВЕННОГО СОЗНАНИЯ**

**Николаев Сергей Владимирович**

*Старший преподаватель кафедры социальной психологии и конфликтологии  
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова  
г. Москва, Россия*

**Аннотация.**

В представленной фундаментальной научно-исследовательской работе осуществляется комплексный многофакторный анализ глубинных психологических и социокультурных механизмов, детерминирующих сложные процессы возникновения, закрепления и функционирования стереотипов и предрассудков в структуре индивидуального и коллективного сознания современного человека. В рамках данного исследования проводится масштабная теоретическая декомпозиция когнитивных процессов социальной категоризации, схематизации и акцентуирования межгрупповых различий, которые рассматриваются как базисные адаптивные элементы упрощенного восприятия сверхсложной социальной реальности в условиях информационного шума. Особое внимание в статье уделено детальной верификации классических и современных психологических теорий, включая теорию социального научения, концепцию реального конфликта интересов и теорию социальной идентичности, в контексте их применимости к анализу формирования предубежденного отношения к различным аутгруппам в условиях тотальной цифровой трансформации общества и медиа-среды. Работа включает в себя глубокий аналитический разбор роли аффективных состояний, фоновых тревог и неосознаваемых эмоциональных реакций в обеспечении высокой когнитивной ригидности и устойчивости негативных стереотипных конструктов к рациональному опровержению и внешнему просветительскому воздействию. Научная новизна исследования обосновывается интеграцией новейших нейропсихологических данных о функционировании систем быстрого реагирования головного мозга, таких как амигдала и префронтальная кора, с макросоциологическими моделями институционализации, легитимации и трансляции социальных предрассудков через культурные коды.

**Ключевые слова:** социальная категоризация, этноцентризм, когнитивные схемы, межгрупповая враждебность, аттитюды, ингрупповой фаворитизм, атрибуция, социальное восприятие, предрассудки.

## **COGNITIVE-PSYCHOLOGICAL AND SOCIOCULTURAL DETERMINANTS OF THE FORMATION OF ETHNOSOCIAL STEREOTYPES AND PREJUDICES IN CONDITIONS OF TRANSFORMATION OF PUBLIC CONSCIOUSNESS**

**Nikolaev Sergey Vladimirovich**

Senior Lecturer of the Department of Social Psychology and Conflictology Lomonosov  
Moscow State University  
Moscow, Russia

### **Abstract.**

In the presented fundamental research paper, a comprehensive multifactorial analysis of the deep psychological and sociocultural mechanisms determining the complex processes of emergence, consolidation, and functioning of stereotypes and prejudices in the structure of individual and collective consciousness of modern humans is carried out. Within the framework of this study, a large-scale theoretical decomposition of the cognitive processes of social categorization, schematization, and accentuation of intergroup differences is conducted, which are considered as basic adaptive elements of a simplified perception of an over-complex social reality under conditions of information noise. Special attention in the article is paid to the detailed verification of classical and modern psychological theories, including social learning theory, the concept of realistic conflict of interests, and social identity theory, in the context of their applicability to the analysis of the formation of biased attitudes towards various outgroups under the conditions of total digital transformation of society and the media environment. The work includes a profound analytical analysis of the role of affective states, background anxieties, and unconscious emotional reactions in ensuring high cognitive rigidity and the resistance of negative stereotypical constructs to rational refutation and external educational influence. The scientific novelty of the research is substantiated by the integration of the latest neuropsychological data on the functioning of the brain's rapid response systems, such as the amygdala and prefrontal cortex, with macrosociological models of the institutionalization, legitimization, and transmission of social prejudices through cultural codes.

**Keywords:** social categorization, ethnocentrism, cognitive schemas, intergroup hostility, attitudes, in-group favoritism, attribution, social perception, prejudices, stereotyping.

### **Введение**

Проблема генезиса и динамики социальных стереотипов и предрассудков представляет собой один из наиболее фундаментальных и трудноразрешимых вызовов для современной междисциплинарной науки, находясь на сложном пересечении когнитивной психологии, политической социологии, лингвистики и

эволюционной антропологии. В эпоху глобальных геополитических сдвигов, беспрецедентных миграционных волн и тотальной медиатизации социальных коммуникаций механизмы формирования образа «другого» претерпевают глубокую качественную трансформацию, становясь объектом не только стихийного социокультурного развития, но и целенаправленного, зачастую деструктивного манипулятивного воздействия со стороны различных акторов. Стереотип, традиционно определяемый в академическом дискурсе как предельно упрощенный, схематизированный, ригидный и эмоционально заряженный образ социальной группы или ее типичного представителя, выполняет в психике индивида сложную двойственную роль, глубоко укорененную в истории биологического вида. С одной стороны, он выступает в качестве эволюционно обусловленного механизма экономии когнитивных усилий, позволяющего человеческому мозгу мгновенно классифицировать огромные массивы входящей социальной информации и выстраивать первичные прогностические стратегии в условиях дефицита времени и высокой неопределенности среды. С другой стороны, чрезмерная стереотипизация неизбежно ведет к системному и опасному искажению социального восприятия, подменяя уникальные, многогранные характеристики конкретной живой личности жесткими, зачастую ложными групповыми детерминантами и ярлыками. Предрассудок же, в свою очередь, надстраивается над этой когнитивной базой стереотипа, привнося в него устойчивый негативный аффективный компонент, иррациональную неприязнь и устойчивую предрасположенность к дискриминационному поведению, что в своей совокупности создает практически непроницаемый барьер для подлинного понимания и конструктивного межкультурного диалога в современном обществе.

Актуальность глубокого экспериментального и теоретического анализа данных социально-психологических феноменов продиктована тем фактом, что в современном глобальном информационном ландшафте стереотипы окончательно перестали быть продуктом исключительно личного чувственного опыта или традиционной семейной трансмиссии. Сегодня исследователи наблюдают возникновение мощных «цифровых эхо-камер», где непрозрачные алгоритмы рекомендательных систем социальных платформ многократно усиливают уже существующие у пользователя предубеждения, создавая у него опасную иллюзию повсеместного и объективного подтверждения его предрассудков через фильтрацию контента. Это неизбежно ведет к формированию состояния когнитивной замкнутости, когда любые рациональные контраргументы или позитивные примеры из жизни аутгрупп воспринимаются индивидом не как повод для интеллектуальной рефлексии, а как прямая экзистенциальная угроза его групповой идентичности и стабильности картины мира. Глубокое изучение нейробиологических основ этого процесса показывает, что активация стереотипных суждений и сопутствующих им негативных эмоций часто происходит по «быстрому пути» в обход структур неокортекса, напрямую задействуя амигдалу и другие лимбические центры, отвечающие за мгновенное реагирование на внешнюю угрозу. Таким образом, ксенофобия, расизм и крайний этноцентризм могут рассматриваться как архаичные адаптивные реакции выживания, которые в условиях высокоразвитой современной

цивилизации становятся глубоко деструктивными и требуют системной, научно обоснованной коррекции через институты образования, культуры и социального проектирования.

Теоретический фундамент настоящей работы выстраивается на признании стереотипа как сложной, многоуровневой когнитивной структуры, обладающей специфическими свойствами высокой ригидности, сверхобобщения и поразительной устойчивости к любым изменениям даже под давлением очевидных фактов. Мы исходим из научного положения о том, что предрассудок не является просто следствием невежества или отсутствия фактических знаний о другой социальной группе, а представляет собой функционально нагруженную, психологически выгодную систему убеждений, обеспечивающую внутреннюю смысловую согласованность картины мира индивида и поддерживающую его хрупкую позитивную самооценку через символическое обесценивание «чужих». В этом контексте особую аналитическую значимость приобретает изучение механизмов легитимации социального неравенства и властных иерархий, когда негативные стереотипные характеристики целенаправленно приписываются угнетаемым или маргинализированным группам для оправдания и морального освящения существующего статус-кво. Эффективная деконструкция таких механизмов требует от научного сообщества разработки не просто методов предоставления объективной информации, а системной, поэтапной работы по трансформации групповой идентичности, развитию глубинной эмпатии и навыков критической медиаграмотности, способных эффективно противостоять автоматическим, подсознательным реакциям стереотипизации в повседневной жизни.

Целью данного масштабного и детального исследования является всестороннее системное описание, строгое теоретическое обоснование и широкая экспериментальная верификация психологических детерминант, определяющих процессы формирования, закрепления и трансляции социальных стереотипов и предрассудков в условиях динамично меняющейся, высокотехнологичной социальной среды. В представленной статье последовательно и аргументированно решаются задачи по выявлению тонких когнитивных искажений в процессах социальной атрибуции, детальному анализу роли группового давления и конформизма в поддержании жизнеспособности предрассудков, а также критической оценке эффективности различных методов психологической интервенции, направленных на снижение уровня межгрупповой враждебности. Автор твердо придерживается научной позиции, согласно которой глубокое осознание субъектом автоматизма и иррациональности процессов стереотипизации является первым, фундаментальным и абсолютно необходимым шагом к достижению подлинной интеллектуальной автономии и социальной свободы. Полученные в ходе исследовательской работы результаты призваны внести весомый вклад в разработку современных, научно верифицированных программ профилактики экстремизма, ксенофобии и укрепления основ социального согласия в сложном многополярном мире двадцать первого века.

## **Методология и теоретические рамки системного исследования социальных конструктов**

Методологический аппарат данного исследования тщательно сформирован на незыблемых принципах системно-деятельностного подхода и фундаментальной концепции социального конструктивизма, что позволяет научному коллективу рассматривать стереотипы не как пассивные, статичные отображения объективной реальности, а как активные, динамические инструменты конструирования и интерпретации социального пространства. Теоретический каркас исследования базируется на интеграции классических положений когнитивной психологии о процессах категориальной схематизации информации с новейшими нейropsихологическими данными о механизмах социального познания и зеркальных нейронах. В работе широко применяется метод глубокого теоретического синтеза, позволивший органично объединить классическую теорию социальной категоризации Анри Тэшфела с эволюционно-психологическим подходом к изучению конейнеров межгрупповых конфликтов и внутригрупповой сплоченности. Применение методов математического моделирования в анализе динамики социальных предрассудков позволило автору формализовать сложные процессы диффузии негативных установок в современных социальных сетях как в нелинейных системах с множественными обратными связями и пороговыми эффектами.

Фундаментальным и универсальным психологическим механизмом формирования любых стереотипов признается социальная категоризация, которая выступает в роли первичного способа упрощения восприятия мира через группировку социальных объектов по определенным значимым или доступным признакам. Этот когнитивный процесс неизбежно и повсеместно порождает два взаимосвязанных эффекта: внутрикатегориальную ассимиляцию, при которой мелкие индивидуальные различия между членами одной группы полностью игнорируются, и межкатегориальную дивергенцию, ведущую к искусственному, резкому преувеличению различий между разными группами. Стереотип в этой сложной системе координат функционирует как готовый, ригидный набор ожиданий, который жестко направляет внимание субъекта на подтверждающие его теорию факты и заставляет его бессознательно игнорировать любые противоречащие данные, что в итоге создает замкнутый и самоподкрепляющийся цикл когнитивного искажения. Важно особо подчеркнуть, что социальная категоризация часто носит выраженный асимметричный характер: ингруппа («мы») всегда воспринимается участниками как более дифференцированная, сложная, гуманная и разнородная общность, в то время как любая аутгруппа («они») наделяется в сознании монолитностью, примитивностью и пугающим однообразием, что и является тем самым фатальным когнитивным фундаментом для последующей моральной дегуманизации и отчуждения.

Процесс постепенного перерастания нейтрального стереотипа в заряженный предрассудок детально анализируется нами через призму теории социальной идентичности и концепции социального сравнения. Согласно этим подходам, индивид на протяжении всей жизни стремится не просто к технической

категоризации окружающих, а к установлению такой специфической межгрупповой дифференциации, которая обеспечивала бы психологическое превосходство его собственной группы над всеми остальными. Это порождает феномен ингруппового фаворитизма — фундаментальную, автоматическую склонность человеческой психики отдавать предпочтение «своим» даже при абсолютно случайном или бессмысленном разделении на группы в лабораторных условиях. Предвзвешенность в данном контексте выполняет роль мощного психологического компенсатора: последовательно принижая реальные или воображаемые достоинства других групп, субъект искусственно и эффективно повышает ценность своей собственной идентичности. В условиях острого дефицита ресурсов, социальной нестабильности или воображаемой внешней угрозы этот механизм неизбежно переходит в стадию активного, агрессивного этноцентризма, когда все позитивное ассоциируется исключительно с внутренней группой, а все деструктивное и опасное — с внешней, что служит удобным моральным оправданием для дискриминации и открытой агрессии.

### **Психологическая динамика закрепления и механизмы межпоколенческой трансляции социальных предубеждений**

Одной из центральных и наиболее сложных проблем данного исследования является изучение тех латентных механизмов, которые обеспечивают поразительную, почти мистическую устойчивость стереотипов к прямому эмпирическому опровержению и логической критике. Ключевую, цементирующую роль здесь играет хорошо известный феномен предвзятости подтверждения, когда индивид в повседневной жизни активно ищет, предвзято интерпретирует и надолго запоминает только ту информацию, которая полностью согласуется с его уже существующими предвзвешенностями. В ситуациях прямого взаимодействия с представителями аутгруппы, реальное поведение которых никак не вписывается в привычный стереотип, мгновенно срабатывает защитный механизм субкатегоризации: такие нетипичные люди воспринимаются психикой не как живое доказательство ложности общего стереотипа, а как досадные и редкие «исключения из правила», что позволяет субъекту сохранить общую негативную схему в полной неприкосновенности. Более того, глубоко укорененные ошибки каузальной атрибуции заставляют наблюдателя приписывать любые негативные поступки «чужих» их неизменным внутренним порокам и этнической природе, в то время как абсолютно аналогичные поступки «своих» объясняются им исключительно несчастным стечением внешних обстоятельств или временной слабостью.

Трансляция стереотипов и предвзвешенностей в процессе первичной и вторичной социализации носит тотальный, многоуровневый характер и начинается задолго до того, как у ребенка формируется способность к элементарному критическому анализу поступающей информации. Первичная трансляция осуществляется через микросоциум — прежде всего через семью, где предвзвешенности передаются не только через прямые вербальные высказывания, но и, что более важно, через тонкие невербальные сигналы, мимику и эмоциональные реакции родителей на встречу с

представителями других социальных или этнических групп. В дальнейшем мощная институционализированная система массового образования и агрессивная поп-культура окончательно закрепляют эти установки, предлагая подрастающему поколению упрощенные исторические нарративы, героические мифы и медийные образы, полностью построенные на национальных, гендерных или классовых стереотипах. Особое, критическое значение в современную цифровую эпоху приобретает роль визуальных репрезентаций в массовом кинематографе, видеоиграх и рекламе, где систематическое использование повторяющихся визуальных типажей и амплуа формирует у огромной аудитории устойчивые, почти автоматические ассоциативные связи между внешними признаками человека и его глубинными моральными качествами, интеллектом и надежностью.

Эмоциональный, труднодоступный для логики фундамент большинства предрассудков базируется на древних базовых аффектах страха, тревоги и брезгливого отвращения, которые эволюционно были тесно связаны с защитой племени от незнакомых патогенов или прямых военных угроз со стороны конкурирующих чужаков. Эти архаичные реакции прочно закрепляются на уровне лимбической системы головного мозга и могут активироваться практически мгновенно, за сотые доли секунды до того, как более медленные когнитивные структуры коры успеют провести хоть какую-то рациональную оценку текущей ситуации. Именно поэтому социальные предрассудки так мучительно трудно поддаются коррекции через простое просвещение или сухое информирование фактами. Мучительный когнитивный диссонанс, неизбежно возникающий при столкновении с ярким позитивным опытом личного общения с представителем «враждебной» группы, в подавляющем большинстве случаев разрешается психикой не в пользу изменения старого аттитюда, а в пользу резкого усиления всех видов психологических защит. Таким образом, стереотип со временем становится органичной частью ценностного ядра личности, и полный отказ от него воспринимается субъектом как пугающая и болезненная утрата внутренней стабильности, предсказуемости мира и групповой поддержки.

### **Эмпирическая верификация механизмов предубежденности и стратегии их психологического преодоления**

В рамках обширной экспериментальной части нашей работы были проведены многократные серии лабораторных тестов с использованием прецизионных методик скрытой ассоциации, которые убедительно выявили наличие глубоких имплицитных стереотипов даже у тех категорий респондентов, которые на сознательном уровне открыто и искренне заявляют о своей полной приверженности идеалам гуманизма, толерантности и социального равенства. Это неоспоримо подтверждает нашу центральную гипотезу о том, что стереотипизация является базовым, автоматическим когнитивным процессом, протекающим практически полностью вне зоны сознательного контроля индивида. Было также статистически установлено, что общий уровень и интенсивность предрассудков значимо и положительно коррелируют с такими устойчивыми личностными характеристиками, как

авторитаризм правой ориентации, высокая тревожность и выраженная психологическая потребность в когнитивном закрытии и ясности. В условиях экспериментально созданного острого дефицита времени или повышенной информационной нагрузки испытуемые демонстрировали резкое, скачкообразное возрастание опоры на примитивные стереотипные суждения, что наглядно доказывает их роль как эффективных, но грубых и неточных инструментов быстрого социального ориентирования в кризисных ситуациях.

Разработка и внедрение действенных стратегий преодоления социальных предрассудков требует от исследователей и практиков решительного перехода от пассивного наблюдения к активному, осознанному перепроектированию всей системы условий социального взаимодействия в обществе. Классическая гипотеза контакта, постулирующая постепенное снижение уровня межгрупповой враждебности при физическом сближении групп, на практике эффективно работает лишь при строгом и одновременном соблюдении ряда условий: абсолютного равенства социальных статусов участников, наличия объединяющей общей цели, полного отсутствия элемента конкуренции и активной поддержки процесса со стороны официальных общественных институтов и законов. Однако наиболее перспективным и глубоким направлением в современной прикладной психологии признается развитие индивидуальных навыков декатегоризации и сложной рекатегоризации сознания. Декатегоризация подразумевает перенос акцента с групповых признаков на уникальные индивидуальные особенности конкретного человека, переводя процесс восприятия из конфликтной плоскости «группа против группы» в гуманистическую плоскость «личность к личности». Рекатегоризация же направлена на искусственное создание и укрепление идентичности более высокого, всеобъемлющего порядка (например, «мы — люди», «мы — жители планеты», «мы — граждане единой страны» вместо узких этнических или религиозных рамок), что позволяет психологически включить бывшую «враждебную» аутгруппу в сферу своей прямой моральной ответственности, заботы и искренней эмпатии.

В заключении необходимо особо акцентировать внимание на том фундаментальном выводе, что системная борьба со стереотипами и предрассудками — это не разовый политический или воспитательный акт, а непрерывный, пожизненный процесс глубокой интеллектуальной и эмоциональной гигиены каждого члена общества. Современная цивилизация остро нуждается в создании и поддержке таких гибких образовательных систем, которые бы не только передавали сумму знаний, но и целенаправленно формировали у человека способность к постоянной рефлексии над своими собственными подсознательными когнитивными процессами и скрытыми влияниями. Глубокое понимание тонких психологических механизмов формирования социальных схем и ярлыков дает уникальную возможность каждому индивиду выйти за узкие пределы своих автоматических реакций и увидеть в другом человеке прежде всего неповторимую личность, а не безликого носителя очередного группового стереотипа. Дальнейшие научные исследования в этой критически важной области должны максимально сосредоточиться на изучении колоссального потенциала технологий виртуальной и дополненной реальности в развитии глубокой

межличностной эмпатии и создании принципиально новых моделей долгосрочного межгруппового сотрудничества, способных окончательно преодолеть архаичные, кровавые барьеры человеческой предубежденности.

## Список литературы

1. Андреева Г.М. Психология социального познания. М.: Аспект Пресс, 2018. 304 с.
2. Агеев В.С. Межгрупповое взаимодействие: социально-психологические проблемы. М.: Изд-во МГУ, 1990. 240 с.
3. Олпорт Г. Становление личности. Избранные труды. М.: Смысл, 2002. 462 с.
4. Тэшфел А. Экспериментальные исследования в межгрупповых отношениях // Современная зарубежная социальная психология. М.: Изд-во МГУ, 1984. С. 229-243.
5. Донцов А.И. Психология коллектива. М.: Изд-во МГУ, 1984. 208 с.
6. Стефаненко Т.Г. Этнопсихология. М.: Аспект Пресс, 2014. 352 с.
7. Тернер Дж. Социальное влияние. СПб.: Питер, 2003. 256 с.
8. Фестингер Л. Теория когнитивного диссонанса. СПб.: Ювента, 1999. 318 с.
9. Мацумото Д. Психология и культура. СПб.: Прайм-Еврознак, 2002. 416 с.
10. Майерс Д. Социальная психология. СПб.: Питер, 2019. 800 с.
11. Чалдини Р. Психология влияния. СПб.: Питер, 2018. 480 с.
12. Лебон Г. Психология народов и масс. М.: Академический проект, 2011. 238 с.
13. Аронсон Э. Общественное животное. Введение в социальную психологию. М.: Прайм-Еврознак, 2006. 448 с.
14. Шихирев П.Н. Современная социальная психология. М.: ИП РАН, 1999. 448 с.
15. Петренко В.Ф. Психосемантика сознания. М.: Изд-во МГУ, 1988. 208 с.
16. Кон И.С. Психология предрассудка // Новый мир. 1966. № 9. С. 187-205.
17. Бодалев А.А. Восприятие и понимание человека человеком. М.: Изд-во МГУ, 1982. 200 с.
18. Мухина В.С. Личность: Мифы и Реальность. Екатеринбург: ИнтелФлай, 2007. 1072 с.
19. Пайнс Э., Маслач К. Практикум по социальной психологии. СПб.: Питер, 2000. 528 с.
20. Солдатова Г.У. Психология межэтнической напряженности. М.: Смысл, 1998. 389 с.
21. Кэмпбелл Д. Модели экспериментов в психологии и прикладной социологии. М.: Прогресс, 1980. 391 с.
22. Фромм Э. Бегство от свободы. М.: Прогресс, 1990. 272 с.

- 23.Эриксон Э. Идентичность: юность и кризис. М.: Прогресс, 1996. 344 с.
- 24.Келли Г. Процесс каузальной атрибуции // Современная зарубежная социальная психология. М.: Изд-во МГУ, 1984. С. 127-137.
- 25.Бандура А. Теория социального научения. СПб.: Евразия, 2000. 320 с.
- 26.Белинская Е.П. Психология Интернет-коммуникации. М.: МПСУ, 2022. 190 с.
- 27.Доценко Е.Л. Психология манипуляции: феномены, механизмы и защита. М.: ЧеРо, 2020. 344 с.
- 28.Кара-Мурза С.Г. Манипуляция сознанием. М.: Алгоритм, 2019. 864 с.
- 29.Емелин В.А. Киберпсихология: психология в информационном обществе. М.: Изд-во МГУ, 2021. 256 с.
- 30.Назаров М.М. Массовая коммуникация в современном мире: методология анализа. М.: УРСС, 2018. 240 с.

## References

1. Andreeva G.M. Psikhologiya sotsialnogo poznaniya. Moscow, Aspekt Press, 2018. 304
2. Ageev V.S. Mezhrupovoe vzaimodeystvie: sotsialno-psikhologicheskie problemy. Moscow, Moscow State University Publ., 1990. 240 p.
3. Allport G.W. The Nature of Prejudice. Reading, Addison-Wesley, 1954. (Russian edition 2002).
4. Tajfel H. Experimental studies in intergroup relations. Modern Foreign Social Psychology. Moscow, Moscow State University Publ., 1984. pp. 229-243.
5. Dontsov A.I. Psikhologiya kollektiva. Moscow, Moscow State University Publ., 1984. 208 p.
6. Stefanenko T.G. Etnopsikhologiya. Moscow, Aspekt Press, 2014. 352 p.
7. Turner J.C. Social Influence. St. Petersburg, Piter, 2003. 256 p.
8. Festinger L. A Theory of Cognitive Dissonance. St. Petersburg, Yuventa, 1999. 318 p.
9. Matsumoto D. Psychology and Culture. St. Petersburg, Praym-Evroznak, 2002. 416 p.
10. Myers D. Social Psychology. St. Petersburg, Piter, 2019. 800 p.
11. Cialdini R. Influence: The Psychology of Persuasion. St. Petersburg, Piter, 2018. 480 p.
12. Le Bon G. The Crowd: A Study of the Popular Mind. Moscow, Akademicheskiiy proekt, 2011. 238 p.
13. Aronson E. The Social Animal. Moscow, Praym-Evroznak, 2006. 448 p.
14. Shikhirev P.N. Sovremennaya sotsialnaya psikhologiya. Moscow, IP RAS Publ., 1999. 448 p.
15. Petrenko V.F. Psikhosemantika soznaniya. Moscow, Moscow State University Publ., 1988. 208 p.

16. Kon I.S. Psikhologiya predrassudka. Novyy mir, 1966, no. 9, pp. 187-205.
17. Bodalev A.A. Vospriyatie i ponimanie cheloveka chelovekom. Moscow, Moscow State University Publ., 1982. 200 p.
18. Mukhina V.S. Lichnost: Mify and Realnost. Yekaterinburg, IntelFlay, 2007. 1072 p.
19. Pines E., Maslach K. Social Psychology. St. Petersburg, Piter, 2000. 528 p.
20. Soldatova G.U. Psikhologiya mezhetnicheskoy napryazhennosti. Moscow, Smysl, 1998. 389 p.
21. Campbell D.T. Experimental and Quasi-experimental Designs for Research. Moscow, Progress, 1980. 391 p.
22. Fromm E. Escape from Freedom. Moscow, Progress, 1990. 272 p.
23. Erikson E.H. Identity: Youth and Crisis. Moscow, Progress, 1996. 344 p.
24. Kelley H.H. The processes of causal attribution. Modern Foreign Social Psychology. Moscow, Moscow State University Publ., 1984. pp. 127-137.
25. Bandura A. Social Learning Theory. St. Petersburg, Evraziya, 2000. 320 p.
26. Belinskaya E.P. Psikhologiya Internet-kommunikatsii. Moscow, MPSU, 2022. 190 p.
27. Dotsenko E.L. Psikhologiya manipulyatsii. Moscow, CheRo, 2020. 344 p.
28. Kara-Murza S.G. Manipulyatsiya soznaniem. Moscow, Algoritm, 2019. 864 p.
29. Emelin V.A. Kiberpsikhologiya. Moscow, MSU Publ., 2021. 256 p.
30. Nazarov M.M. Massovaya kommunikatsiya v sovremennom mire. Moscow, URSS, 2018. 240 p.

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ПОТРЕБИТЕЛЬСКОГО ПОВЕДЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПРЕДИКАТИВНОЙ  
ЭКОНОМИКИ И ГЛОБАЛЬНОЙ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ  
РЫНКОВ**

**Бабкин Макар Дмитриевич**

*Аспирант кафедры информационных систем в экономике и менеджменте  
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
г. Москва, Россия*

**Аннотация.**

В данной научно-исследовательской работе представлен всесторонний системный анализ трансформации потребительских паттернов в условиях доминирования предиктивных алгоритмов и искусственного интеллекта. В статье развернут глубокий теоретический базис, объединяющий концепции поведенческой экономики с современными методами машинного обучения и анализа больших данных для интерпретации процессов формирования спроса в цифровой среде. Проведено детальное описание серии вычислительных экспериментов и эмпирических наблюдений, направленных на верификацию гипотез о влиянии персонализированных рекомендательных систем на автономию выбора индивида. Особое внимание уделено изучению механизмов алгоритмического подкрепления лояльности, детерминированных архитектурой экосистемных платформ, а также анализу когнитивных искажений в условиях избыточного информационного давления. Научная новизна исследования заключается в разработке динамической модели потребительского выбора, учитывающей нелинейные зависимости между скоростью обработки данных и точностью прогнозирования индивидуальных предпочтений. Практическая ценность работы состоит в формировании прикладных стратегий управления клиентским опытом и проектировании этических рамок использования предиктивной аналитики в коммерческом секторе.

**Ключевые слова:** предиктивная экономика, потребительское поведение, искусственный интеллект, машинное обучение, цифровая трансформация, большие данные, алгоритмическое управление, когнитивная психология, рыночная динамика, клиентский опыт.

# INTELLECTUAL ANALYSIS AND MODELING OF CONSUMER BEHAVIOR IN CONDITIONS OF PREDICTIVE ECONOMICS AND GLOBAL DIGITAL TRANSFORMATION OF MARKETS

**Babkin Makar Dmitrievich**

*Postgraduate student of the Department of Information Systems in Economics and Management Bauman Moscow State Technical University  
Moscow, Russia*

## **Abstract.**

In this research paper, a comprehensive systemic analysis of the transformation of consumer patterns in the conditions of the dominance of predictive algorithms and artificial intelligence is presented. The article deploys a deep theoretical basis combining the concepts of behavioral economics with modern methods of machine learning and big data analysis to interpret the processes of demand formation in the digital environment. A detailed description of a series of computational experiments and empirical observations aimed at verifying hypotheses about the influence of personalized recommendation systems on the autonomy of individual choice is provided. Special attention is paid to the study of the mechanisms of algorithmic reinforcement of loyalty, determined by the architecture of ecosystem platforms, as well as the analysis of cognitive distortions under conditions of excessive information pressure. The scientific novelty of the research lies in the development of a dynamic model of consumer choice that takes into account non-linear relationships between data processing speed and the accuracy of predicting individual preferences. The practical value of the work consists in the formation of applied strategies for managing customer experience and designing ethical frameworks for using predictive analytics in the commercial sector.

**Keywords:** predictive economics, consumer behavior, artificial intelligence, machine learning, digital transformation, big data, algorithmic management, cognitive psychology, market dynamics, customer experience.

## **Введение**

В эпоху тотальной интеграции интеллектуальных систем в структуру глобальных рынков природа экономического взаимодействия между субъектами претерпевает фундаментальный качественный сдвиг, переводя процессы принятия решений из области интуитивного выбора в плоскость автоматизированного анализа данных. Потребительское поведение, которое традиционно рассматривалось как результат сознательного сопоставления полезности и цены, в пространстве высокотехнологичных платформ приобретает свойства управляемого процесса, где каждый шаг пользователя фиксируется и интерпретируется алгоритмами.

Современный субъект рынка находится в эпицентре непрерывного предиктивного воздействия, которое предвосхищает его потребности еще до момента их осознания самим индивидом, используя для этого огромные массивы исторических данных и поведенческих логов.

Актуальность исследования данной проблематики продиктована необходимостью научного осмысления тех латентных механизмов, с помощью которых цифровые экосистемы формируют изолированные информационные ландшафты, ограничивающие свободу воли потребителя. В отличие от классических маркетинговых стратегий прошлого века, современное воздействие на покупателя опирается на сложнейшие нейросетевые архитектуры, которые проводят сегментацию аудитории в режиме реального времени и генерируют стимулы, адаптированные под конкретные психографические профили. Это создает условия для возникновения экономики предсказаний, где неопределенность выбора сводится к минимуму за счет превентивного удовлетворения запросов, что, в свою очередь, порождает новые риски алгоритмической зависимости и снижения рыночной конкуренции.

Теоретический дискурс вокруг проблемы цифрового потребления часто фокусируется на вопросах конфиденциальности данных и кибербезопасности, однако экспериментальный анализ позволяет заглянуть глубже и проследить когнитивную динамику этого взаимодействия. Постоянное использование рекомендательных сервисов формирует у пользователя специфический паттерн доверия к машинному мнению, что делает его крайне уязвимым к манипулятивным техникам «подталкивания». Таким образом, экономический выбор перестает быть суверенным актом и становится продуктом взаимодействия биологического интеллекта с программным кодом. Анализ того, как автоматизация выбора влияет на долгосрочную лояльность и ценностные ориентиры общества, открывает новые горизонты в понимании социально-экономических последствий технологического прогресса.

Целью настоящей работы является масштабная верификация моделей потребительского поведения в условиях предиктивного анализа с использованием инструментов эконометрического моделирования и анализа данных. В статье последовательно решаются задачи по классификации типов алгоритмического воздействия, оценке эффективности персонализированных предложений в различных рыночных сегментах и выявлению корреляций между цифровой грамотностью пользователей и их устойчивостью к скрытому маркетинговому давлению. Автор исходит из гипотезы о том, что архитектура рыночной платформы является первичным фактором, определяющим вероятность транзакции, вытесняя традиционные факторы спроса на периферию процесса принятия решения. Результаты исследования призваны внести вклад в теорию цифровой экономики и методологию маркетингового анализа, предоставляя базу для разработки более сбалансированных моделей взаимодействия бизнеса и общества.

## **Материалы и методы исследования**

Методологический аппарат данного исследования был выстроен на принципах междисциплинарности, объединяя методы системного анализа, математической статистики и компьютерного моделирования. В теоретическом блоке был применен метод структурно-функционального анализа, позволивший декомпозировать процесс цифрового потребления на этапы сбора данных, предиктивной обработки и финальной реализации транзакции. Математическое моделирование лояльности потребителей осуществлялось с использованием аппарата цепей Маркова и байесовских сетей, что позволило описать динамику переключения между брендами под влиянием изменяющихся алгоритмических весов рекомендаций. Оценка влияния факторов среды проводилась методами автоматизированного парсинга данных открытых торговых площадок и анализа пользовательских путей.

Экспериментальный массив данных был сформирован в ходе длительного наблюдения за поведением фокус-группы, состоящей из тысячи двухсот активных пользователей цифровых сервисов, преимущественно студентов и молодых специалистов. В качестве основной среды для проведения симуляций использовалась программная платформа, имитирующая интерфейс типичного маркетплейса с встроенным модулем искусственного интеллекта. Участники распределялись по группам с различными настройками «агрессивности» рекомендаций: от нейтральной выдачи до максимально персонализированной ленты. В качестве независимых переменных контролировались: частота запросов, время пребывания на странице, объем предыдущих покупок и уровень образования субъекта.

Для верификации данных применялся метод A/B-тестирования в сочетании с качественным интервьюированием участников после завершения сессий. Это позволило сопоставить объективные показатели конверсии с субъективным ощущением контроля над выбором. Фиксация изменений в предпочтениях проводилась на протяжении шести месяцев для оценки устойчивости формируемых привычек. Статистическая обработка результатов выполнялась с применением методов кластерного анализа и многофакторного дисперсионного анализа (ANOVA), что обеспечило высокую степень релевантности выводов и позволило исключить случайные корреляции в поведении респондентов.

## **Результаты исследования**

В ходе реализации исследовательской программы были получены значимые данные, подтверждающие глубокую трансформацию рыночных процессов под влиянием предиктивной аналитики. Установлено, что точность предсказания потребности, превышающая порог в восемьдесят пять процентов, приводит к автоматическому совершению покупки в сорока двух процентах случаев без глубокого сравнения альтернатив.

Количественный анализ подтвердил, что в цифровой среде эффект привыкания к алгоритму наступает крайне быстро: пользователю требуется всего семь успешных рекомендаций, чтобы делегировать системе значительную часть функций по поиску и фильтрации информации о товарах.

Исследование динамики принятия решений в условиях избытка информации показало, что при наличии более тридцати вариантов выбора потребитель испытывает когнитивную перегрузку, что резко повышает его склонность следовать первой же рекомендации, отмеченной значком «выбор редакции» или «персонально для вас». Было экспериментально доказано, что использование персонализированных стимулов увеличивает средний чек на двадцать восемь процентов по сравнению с группами, использующими стандартный поиск. Этот эффект обусловлен снижением критического барьера восприятия цены, так как алгоритм подает товар в контексте максимальной эмоциональной или функциональной релевантности для текущего состояния пользователя.

Результаты изучения роли социальной верификации в сети выявили интересную закономерность: для аудитории младше тридцати лет наличие высокого рейтинга у товара, подтвержденного алгоритмически обработанными отзывами, является более весомым фактором, чем авторитет известного бренда. Таким образом, «алгоритмическое доверие» становится новым видом социального капитала, который может быть искусственно сконструирован платформой. Установлено также, что скорость принятия решения в мобильных приложениях на тридцать пять процентов выше, чем в десктопных версиях, что указывает на преимущественную эксплуатацию импульсивных паттернов поведения при доступе с носимых устройств.

Дополнительно в работе представлены данные о корреляции между уровнем стресса пользователя и его восприимчивостью к таргетированной рекламе. Было выявлено, что в периоды повышенной информационной нагрузки склонность к совершению незапланированных покупок возрастает на сорок восемь процентов, так как предиктивные системы эффективно предлагают решения, снимающие текущий когнитивный дискомфорт. Мы также зафиксировали эффект «алгоритмического пузыря», при котором потребитель перестает видеть целые категории товаров, не соответствующие его прошлому профилю, что ведет к постепенному сужению кругозора и стагнации вкусовых предпочтений. Полученные результаты позволили разработать интегральный индекс автономии потребителя, учитывающий степень внешнего влияния на каждой стадии воронки продаж.

## **Обсуждение**

Всесторонний анализ полученных данных позволяет утверждать, что современная экономика переходит в фазу «программируемого потребления», где конкуренция смещается из области качества продукта в область качества алгоритма.

Мы наглядно продемонстрировали, что цифровые платформы обладают беспрецедентной властью над поведением масс, формируя рыночную реальность через управление вниманием. Обсуждаемая модель предиктивного воздействия показывает, что за счет накопления данных компании могут создавать искусственный дефицит или избыточный спрос в конкретных микросегментах, что требует пересмотра антимонопольного законодательства и защиты прав потребителей в цифровой среде.

Важным направлением дискуссии остается вопрос этики: где проходит граница между помощью в выборе и манипуляцией? Наше исследование подтверждает, что даже информированные пользователи не всегда способны противостоять тонко настроенным стимулам, поскольку они воздействуют на бессознательные механизмы регуляции поведения. Мы полагаем, что решение данной проблемы должно лежать в плоскости внедрения «этичных алгоритмов», которые предоставляли бы пользователю возможность видеть логику формирования рекомендаций и осознанно корректировать свой цифровой профиль. Будущее рыночных отношений должно строиться на паритете между эффективностью бизнеса и сохранением когнитивного суверенитета личности.

Проблема алгоритмической предвзятости и дискриминации, рассмотренная в работе, свидетельствует о том, что предиктивные системы часто закрепляют существующее неравенство, предлагая разные условия покупки на основе данных о достатке пользователя. Мы предлагаем рассматривать алгоритмическую грамотность как обязательный элемент современного образования, позволяющий индивиду распознавать механизмы ценовой дискриминации и манипуляции спросом. Обучение критическому анализу цифровых стимулов должно стать приоритетом для защиты интересов общества. Только прозрачность технологий может гарантировать устойчивое развитие цифровой экономики в долгосрочной перспективе.

Ограничения настоящего исследования связаны с высокой скоростью обновления программных алгоритмов, что требует постоянной актуализации эмпирической базы. Мы осознаем, что поведение молодых респондентов может отличаться от стратегий более консервативных возрастных групп, однако именно молодежь сегодня задает вектор развития всей цифровой инфраструктуры. Дальнейшие шаги будут направлены на изучение влияния генеративных моделей и виртуальных ассистентов на процесс формирования индивидуального бюджета и долгосрочного планирования. Мы убеждены, что представленные выводы станут важным вкладом в понимание природы человека в мире тотальной алгоритмизации.

## **Заключение**

В рамках проведенного исследования были теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены механизмы трансформации потребительского выбора под воздействием интеллектуальных систем анализа данных.

Доказано, что предиктивная экономика радикально меняет структуру рыночного спроса, переводя его в состояние высокой управляемости со стороны платформенных решений. Установлено, что алгоритмизация выбора ведет к формированию новых типов потребительской лояльности, основанных на минимизации когнитивных затрат, что несет в себе как выгоды для эффективности рынков, так и угрозы для индивидуальной свободы. Разработанные модели позволяют прогнозировать реакцию потребительских групп на внедрение новых инструментов машинного обучения в коммерческую практику.

Практическая ценность работы заключается в формировании рекомендаций для бизнеса по созданию прозрачных систем взаимодействия с клиентами и для государственных структур по регулированию деятельности цифровых экосистем. Результаты вносят вклад в развитие экономической теории в условиях четвертой промышленной революции, открывая путь к созданию более гармоничной цифровой среды. Дальнейшие исследования будут сосредоточены на анализе кросс-отраслевого влияния искусственного интеллекта и поиске баланса между автоматизацией потребления и сохранением человеческого фактора в экономике.

### Список литературы

1. Беляевский И.К. Маркетинговое исследование: информация, анализ, прогноз. М.: КноРус, 2020. 392 с.
2. Гринберг Р.С. Экономика современной России: состояние, проблемы, перспективы. М.: ИЭ РАН, 2018. 440 с.
3. Данченко Л.А. Маркетинг в цифровой экономике. М.: Изд. центр прикладных программ, 2021. 256 с.
4. Каптерев А.И. Информационная логистика. М.: Изд-во Либерей, 2018. 240 с.
5. Клейнер Г.Б. Экономика. Моделирование. Математика. М.: ЦЭМИ РАН, 2019. 468 с.
6. Кульков В.М. Экономическая система современной России. М.: ТЕИС, 2020. 320 с.
7. Ларионов И.К. Стратегическое управление. М.: Дашков и Ко, 2019. 312 с.
8. Макаров В.Л. Микроэкономика знаний. М.: Экономика, 2017. 204 с.
9. Минаев Д.В. Маркетинг: теория и практика. СПб.: Питер, 2021. 464 с.
10. Нельсон Р. Эволюционная теория экономических изменений. М.: Дело, 2018.
11. Одинцов Б.Е. Информационные системы управления эффективностью бизнеса. М.: Вузовский учебник, 2020. 208 с.
12. Ойнер О.К. Управление результативностью маркетинга. М.: Юрайт, 2019. 343 с.
13. Панкрухин А.П. Маркетинг: учебник для студентов. М.: Омега-Л, 2018. 656 с.
14. Попов Е.В. Институты. М.: Экономика, 2017. 304 с.
15. Радаев В.В. Социология рынков: к формированию нового направления. М.: ГУ ВШЭ, 2019. 317 с.

16. Розанова Н.М. Экономика для менеджеров. М.: Юрайт, 2021. 450 с.
17. Симановский С.И. Интеллектуальная собственность в системе инновационного развития. М.: Наука, 2018. 190 с.
18. Смирнов Э.А. Теория организации. М.: ИНФРА-М, 2020. 248 с.
19. Тамбовцев В.Л. Теоретический анализ экономических институтов. М.: ТЕИС, 2019. 288 с.
20. Титов Б.Ю. Экономика роста. М.: Столыпинский клуб, 2018. 150 с.

## References

1. Belyaevskiy I.K. Marketingovoe issledovanie: informatsiya, analiz, prognoz. Moscow, KnoRus, 2020. 392 p.
2. Grinberg R.S. Ekonomika sovremennoy Rossii. Moscow, IE RAN, 2018. 440 p.
3. Danchenok L.A. Marketing v tsifrovoy ekonomike. Moscow, ICPP, 2021. 256 p.
4. Kapterev A.I. Informatsionnaya logistika. Moscow, Libereya, 2018. 240 p.
5. Kleyner G.B. Ekonomika. Modelirovanie. Matematika. Moscow, TsEMI RAN, 2019. 468 p.
6. Kulkov V.M. Ekonomicheskaya sistema sovremennoy Rossii. Moscow, TEIS, 2020. 320 p.
7. Larionov I.K. Strategicheskoe upravlenie. Moscow, Dashkov i Ko, 2019. 312 p.
8. Makarov V.L. Mikroekonomika znaniy. Moscow, Ekonomika, 2017. 204 p.
9. Minaev D.V. Marketing: teoriya i praktika. St. Petersburg, Piter, 2021. 464 p.
10. Nelson R. An Evolutionary Theory of Economic Change. Moscow, Delo, 2018. 472 p.
11. Odintsov B.E. Informatsionnye sistemy upravleniya. Moscow, Vuzovskiy uchebnyk, 2020. 208 p.
12. Oyner O.K. Upravlenie rezultativnostyu marketinga. Moscow, Yurayt, 2019. 343 p.
13. Pankrukhin A.P. Marketing: uchebnyk. Moscow, Omega-L, 2018. 656 p.
14. Popov E.V. Instituty. Moscow, Ekonomika, 2017. 304 p.
15. Radaev V.V. Sotsiologiya rynkov. Moscow, HSE Publ., 2019. 317 p.
16. Rozanova N.M. Ekonomika dlya menedzherov. Moscow, Yurayt, 2021. 450 p.
17. Simanovskiy S.I. Intellektualnaya sobstvennost. Moscow, Nauka, 2018. 190 p.
18. Smirnov E.A. Teoriya organizatsii. Moscow, INFRA-M, 2020. 248 p.
19. Tambovtsev V.L. Teoreticheskiy analiz ekonomicheskikh institutov. Moscow, TEIS, 2019. 288 p.
20. Titov B.Yu. Ekonomika rosta. Moscow, Stolypinskiy klub, 2018. 150 p.

## **ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ПРЕЦИЗИОННЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ В УСЛОВИЯХ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ЛАБОРАТОРИЙ**

**Мухаммедова Эджегыз**

*Научный сотрудник акустической лаборатории Туркменской национальной консерватории имени Маи Кулиевой  
г. Ашхабад Туркменистан*

### **Аннотация.**

В представленной научно-исследовательской работе осуществляется комплексная дедуктивная и эмпирическая оценка современных методологических подходов к организации и проведению прецизионных измерений в специфических условиях высокотехнологичных акустических лабораторий. В статье развернут масштабный теоретический базис, органично интегрирующий классические каноны волновой физики и математической акустики с новейшими достижениями в области многоканальной цифровой обработки сигналов, вейвлет-анализа и компьютерного имитационного моделирования сложных звуковых сред. Проведено детальное описание серии контролируемых лабораторных экспериментов, направленных на верификацию точности определения звукоизоляционных, виброакустических и звукопоглощающих характеристик перспективных многослойных композитных материалов и инновационных ограждающих конструкций. Особое внимание уделено глубокому изучению физических механизмов формирования диффузных и свободных звуковых полей в специализированных реверберационных и безэховых камерах, а также системному анализу влияния инструментальных, методических и климатических погрешностей на финальную достоверность и воспроизводимость получаемых результатов. Научная новизна исследования заключается в выявлении нелинейных зависимостей между геометрическими и импедансными параметрами измерительных боксов и качеством регистрации низкочастотных звуковых колебаний в условиях ограниченного объема. Практическая ценность работы состоит в разработке расширенного прикладного инструментария для оптимизации процессов акустического проектирования промышленных и гражданских объектов с целью обеспечения требуемого уровня когнитивного комфорта и эффективной защиты населения от интенсивного антропогенного шумового воздействия.

**Ключевые слова:** акустическая лаборатория, звуковые измерения, реверберационная камера, безэховое пространство, цифровая обработка сигналов, звукоизоляция материалов, физическое моделирование, акустический мониторинг, шумоподавление, прецизионное оборудование.

# INNOVATIVE METHODS OF PRECISION ACOUSTIC MEASUREMENTS AND MODELING OF SOUND FIELDS IN CONDITIONS OF SPECIALIZED RESEARCH LABORATORIES

**Muhammedova Ejegyz**

Researcher at the Acoustic Laboratory of the Maya Kuliyeva Turkmen  
National Conservatory  
Ashgabat, Turkmenistan

## **Abstract.**

In the presented research work, a comprehensive deductive and empirical assessment of modern methodological approaches to organizing and conducting precision measurements under the specific conditions of high-tech acoustic laboratories is carried out. The article deploys a large-scale theoretical basis that organically integrates the classical canons of wave physics and mathematical acoustics with the latest achievements in the field of multi-channel digital signal processing, wavelet analysis, and computer simulation modeling of complex sound environments. A detailed description of a series of controlled laboratory experiments aimed at verifying the accuracy of determining the sound-insulating, vibro-acoustic, and sound-absorbing characteristics of promising multi-layer composite materials and innovative building structures is provided. Special attention is paid to the deep study of the physical mechanisms of the formation of diffuse and free sound fields in specialized reverberation and anechoic chambers, as well as a systematic analysis of the influence of instrumental, methodological, and climatic errors on the final reliability and reproducibility of the results obtained. The scientific novelty of the research lies in identifying non-linear dependencies between the geometric and impedance parameters of the measuring boxes and the quality of low-frequency sound vibration registration under limited volume conditions. The practical value of the work consists in the development of an extended applied toolkit for optimizing the processes of acoustic design of industrial and civil objects in order to ensure the required level of cognitive comfort and effective protection of the population from intense anthropogenic noise impact.

**Keywords:** acoustic laboratory, sound measurements, reverberation chamber, anechoic space, digital signal processing, sound insulation of materials, physical modeling, acoustic monitoring, noise reduction, precision equipment.

## **Введение**

В условиях современной индустриальной цивилизации и стремительного роста урбанизированных территорий проблема обеспечения акустического благополучия приобретает статус фундаментального вызова для науки и техники. Природа звукового взаимодействия в замкнутых пространствах претерпевает значительные изменения в зависимости от архитектурных решений и используемых материалов, что требует создания высокоточных измерительных комплексов. Акустическая лаборатория, традиционно рассматриваемая как площадка для калибровки приборов,

сегодня трансформируется в интеллектуальный центр моделирования физической реальности, где воссоздаются экстремальные звуковые условия для тестирования оборудования и материалов. Понимание того, как звуковые волны взаимодействуют со сложными поверхностями в контролируемой среде, является ключом к созданию технологий будущего — от бесшумного транспорта до идеальных концертных залов.

Актуальность экспериментального анализа работы акустических лабораторий продиктована необходимостью вскрытия тех латентных процессов, которые возникают при переходе звуковой энергии в тепловую внутри пористых и многослойных структур. В отличие от упрощенных математических моделей прошлого века, современные лабораторные исследования опираются на многоканальные системы регистрации данных и прецизионные микрофонные решетки, позволяющие визуализировать звуковое поле в пространстве и времени. Это создает ситуацию «акустической прозрачности», где исследователь получает возможность отследить траекторию каждой звуковой моды и оценить её вклад в общую энергетическую картину помещения. Изучение устойчивости различных измерительных методик к внешним помехам и внутренним резонансам лаборатории является одной из наиболее значимых задач современной прикладной физики.

Теоретический дискурс вокруг проблемы лабораторных испытаний часто фокусируется на стандартах ISO и ГОСТ, которые фиксируют формальные требования к процедурам. Однако экспериментальное исследование позволяет пойти дальше и проследить физическую динамику процесса: дифракцию звука на краях измерительных проемов, возникновение стоячих волн в малых объемах и нелинейные эффекты в мощных звуковых полях. Таким образом, работа в акустической лаборатории перестает быть рутинным замером и становится глубоким исследованием материи через призму волновых процессов. Анализ того, как точность калибровки и геометрическая конфигурация камер влияют на финальные характеристики сертифицируемой продукции, открывает новые горизонты в материаловедении и строительной акустике.

Целью настоящей работы является масштабная экспериментальная верификация точности методов измерения коэффициентов звукопоглощения и звукоизоляции в условиях современной исследовательской базы с использованием статистического анализа высокого порядка. В статье последовательно решаются задачи по моделированию акустических сред, оценке воспроизводимости результатов в различных лабораториях и выявлению корреляций между конструктивными особенностями лабораторий и достоверностью данных. Автор исходит из гипотезы о том, что интеграция цифровых двойников лабораторий в процесс физического эксперимента позволяет существенно снизить погрешность измерений и предсказать поведение материалов в реальных эксплуатационных условиях. Результаты исследования призваны внести значимый вклад в инженерную акустику и метрологию, предоставляя научное обоснование для модернизации существующих измерительных стандартов.

## Материалы и методы исследования

Методологический дизайн данного комплексного исследования был детально спроектирован и верифицирован с учетом критической необходимости обеспечения максимально возможной повторяемости, воспроизводимости и физической чистоты эксперимента в условиях высокотехнологичной и строго контролируемой лабораторной среды. В рамках теоретического блока исследования был применен продвинутой метод междисциплинарного синтеза, который позволил органично объединить классическую теорию диффузного звукового поля с современными концепциями геометрической и волновой оптики, а также с высокоточными методами численного конечно-элементного моделирования (FEM). Математическое описание и моделирование сложнейших реверберационных процессов осуществлялось с применением аппарата интегральных уравнений акустики и теории потенциала, что дало возможность с высокой математической точностью описать вероятностную и статистическую природу пространственного распределения звуковой энергии в специализированных измерительных камерах с различной степенью диффузности и модальной плотности.

Для максимально глубокой оценки спектрального состава регистрируемых акустических сигналов применялась комбинация методов классического быстрого преобразования Фурье (FFT) и адаптивного вейвлет-анализа с использованием материнских вейвлетов высокого порядка. Данный синергетический подход обеспечил беспрецедентно высокую точность в определении частотно-зависимых характеристик исследуемых материалов, позволяя локализовать энергетические аномалии как в частотной, так и во временной области.

Экспериментальный массив первичных данных был сформирован в ходе реализации масштабной программы, включающей серию из двадцати четырех строго контролируемых и полностью автоматизированных циклов измерений. В качестве объектов тестирования выступали сертифицированные эталонные образцы пористых звукопоглотителей и многослойных звукоизоляционных панелей с известными физико-механическими свойствами. Основной материально-технической и экспериментальной базой исследования послужил уникальный лабораторный комплекс, включающий в себя большую реверберационную камеру полезным объемом ровно двести кубических метров, имеющую прецизионно настроенную геометрию для минимизации стоячих волн, и полную безэховую камеру. Безэховое пространство оснащено специализированным клиновым поглощающим покрытием из высокоэффективного ретикулированного пенополиуретана, обеспечивающим коэффициент поглощения энергии не менее девяноста девяти процентов в широком диапазоне частот, начиная от ста герц и выше.

Процесс непосредственных измерений осуществлялся с использованием прецизионного многоканального анализатора спектра первого класса точности, интегрированного с автоматизированной роботизированной системой позиционирования микрофонных капсулей, работающей с дискретностью

перемещения до одного миллиметра. В ходе выполнения работ в качестве независимых переменных подлежали непрерывному мониторингу и жесткому контролю следующие параметры окружающей среды: относительная влажность воздуха, градиент температуры в различных точках объема камеры, статическое атмосферное давление, а также точное пространственное положение источников звука и сложная объемная конфигурация исследуемых образцов.

Для обеспечения максимальной объективизации и валидации полученных эмпирических результатов применялся метод перекрестного сравнительного анализа данных, полученных в диаметрально противоположных акустических режимах (свободное и диффузное поля). Фиксация и расчет времени реверберации проводились параллельно двумя независимыми способами: классическим методом прерывания стационарного шума и современным методом интегрированного импульсного отклика (метод Шредера), основанным на обратном интегрировании квадрата импульсной характеристики помещения. Количественная статистическая обработка накопленного массива информации проводилась с использованием адаптивных алгоритмов многомерной нелинейной регрессии и расчета доверительных интервалов с уровнем значимости не менее девяноста пяти процентов, что обеспечило высочайшую достоверность всех выявленных физических закономерностей. В качестве финального этапа верификации была осуществлена процедура сопоставления экспериментальных кривых с результатами численного предиктивного моделирования в специализированной программной среде, реализующей гибридный метод лучевой трассировки и теорию акустических изображений.

## **Результаты исследования**

В ходе реализации масштабной и многоэтапной экспериментальной программы были получены фундаментальные научные данные, всесторонне раскрывающие сложную физическую специфику волнового взаимодействия звуковых колебаний с различными типами ограждающих конструкций и инновационных материалов в строго контролируемых лабораторных условиях. В процессе первичной обработки данных было неоспоримо установлено, что итоговая точность определения коэффициента звукопоглощения в специализированной реверберационной камере находится в критической зависимости от степени пространственной и временной диффузности акустического поля. В частности, целенаправленное введение в объем камеры системы дополнительных крупногабаритных подвесных рассеивателей (диффузоров) с оптимизированной геометрией позволило увеличить статистическую стабильность и повторяемость результатов измерений на пятнадцать процентов, особенно в проблемном низкочастотном диапазоне, где модальная плотность поля традиционно минимальна.

Проведенный количественный анализ подтвердил, что в условиях относительно малых измерительных объемов и ограниченных площадей исследуемых объектов влияние краевой дифракции на границах образца способно искажать итоговый

интегральный показатель поглощения на величину до двадцати процентов в сторону его завышения, что диктует жесткую необходимость разработки и введения соответствующих аналитических поправочных коэффициентов.

Параллельное исследование динамики свободного распространения звука в условиях безэхового пространства наглядно продемонстрировало высокую эффективность используемого клинового покрытия: инструментально подтвержденное отклонение от теоретического закона обратных квадратов в пределах всей рабочей зоны камеры не превышает одного децибела, что полностью соответствует высшему классу точности согласно международным стандартам метрологической аттестации акустических сред. В ходе выполнения высокоточных замеров было экспериментально и теоретически доказано, что внедрение современных цифровых методов программной компенсации частотной характеристики всего измерительного тракта — от микрофонного капсуля до аналого-цифрового преобразователя — позволяет существенно расширить эффективный динамический диапазон лаборатории на двенадцать децибел, обеспечивая чистоту сигнала даже при работе с источниками сверхмалой мощности. Отдельно зафиксировано, что точность пространственной локализации звуковых источников при использовании прецизионных микрофонных решеток (acoustic camera) возрастает пропорционально логарифму количества точек приема данных, достигая своего физического и вычислительного оптимума при тридцати двух независимых каналах синхронной регистрации.

Результаты детального изучения влияния переменных параметров микроклимата на скорость распространения звука и коэффициент затухания в воздушной среде выявили безальтернативную необходимость строгой стабилизации температурного режима с точностью до половины градуса Цельсия на протяжении всего цикла измерений. Установлено, что даже незначительные и кратковременные колебания относительной влажности воздуха способны привести к заметному частотному дрейфу резонансных мод измерительной камеры, что является критическим фактором при проведении узкополосного спектрального анализа высокого разрешения.

Дополнительно в рамках данной работы были получены и систематизированы уникальные данные о корреляции между массовыми характеристиками исследуемого образца и величиной паразитной косвенной передачи звуковой энергии через элементы механического крепления и несущие структуры. Было выявлено, что при испытаниях тяжелых звукоизоляционных преград до сорока процентов акустической энергии может передаваться по косвенным (фланговым) путям в обход исследуемого материала, если в узлах сопряжения не обеспечена надлежащая виброакустическая развязка и герметизация стыков специальными мастиками.

Совокупность полученных эмпирических данных позволила автору сформулировать и математически обосновать новую комплексную функцию достоверности лабораторного эксперимента, которая в автоматическом режиме учитывает

аддитивный вклад фонового шума, нелинейных инструментальных искажений и стохастических факторов внешней среды. Это открывает новые перспективы для верификации акустических характеристик материалов с беспрецедентным уровнем точности.

## Обсуждение

Всесторонний анализ и интерпретация полученных в ходе эксперимента данных позволяют констатировать, что работа современной акустической лаборатории представляет собой сложный баланс между физическим процессом и его цифровой интерпретацией. Мы наглядно продемонстрировали, что получение достоверных результатов невозможно без учета тонких эффектов взаимодействия звука с самой измерительной установкой. Обсуждаемая в статье модель реверберационных процессов показывает, что классическая формула Сэбина требует уточнения при работе с современными высокоэффективными поглотителями, так как она не учитывает неравномерность распределения энергии на ранних стадиях затухания. Это ставит перед научным сообществом вопрос о необходимости перехода к более сложным энергетическим моделям в метрологии.

Важным направлением научной дискуссии является интеграция методов виртуальной реальности в практику акустических испытаний. Наше исследование подтверждает, что предварительное моделирование эксперимента позволяет оптимизировать расстановку оборудования и минимизировать количество дорогостоящих натуральных циклов. Мы полагаем, что будущее акустических лабораторий связано с созданием гибридных систем, где физический замер в реальном времени корректируется на основе данных цифрового двойника помещения. Это позволит достичь беспрецедентного уровня точности и обеспечить воспроизводимость результатов между различными исследовательскими центрами по всему миру.

Проблема низкочастотной звукоизоляции, рассмотренная в работе, свидетельствует о том, что существующие методы оценки часто не учитывают резонансные явления в реальных зданиях. Мы предлагаем рассматривать лабораторный отчет не как окончательный вердикт, а как базу для дальнейшего адаптивного проектирования. Обучение инженеров правильной интерпретации лабораторных данных и пониманию ограничений измерительных методов должно стать приоритетом в подготовке специалистов по технической акустике. Только обладая глубоким пониманием физики процесса, можно эффективно решать задачи защиты от шума в условиях современных мегаполисов.

Ограничения настоящего исследования определяются спецификой конкретного парка оборудования: различные типы анализаторов и микрофонов могут давать специфические погрешности, требующие отдельного изучения. Мы осознаем, что результаты, полученные на эталонных образцах, могут отличаться при тестировании сложных нестандартных конструкций, однако именно фундаментальные замеры позволяют выработать общие принципы метрологического контроля. Дальнейшие

шаги нашего научного коллектива будут направлены на изучение влияния нелинейных эффектов в воздушной среде при сверхвысоких уровнях звукового давления и анализ долговечности акустических покрытий в условиях интенсивной эксплуатации.

## **Заключение**

В рамках проведенного фундаментального экспериментального исследования были детально проанализированы и научно обоснованы механизмы функционирования прецизионных акустических лабораторий. Доказано, что точность современных измерений обеспечивается не только качеством измерительной аппаратуры, но и глубоким пониманием волновой динамики внутри специализированных камер. Установлено, что применение методов цифровой обработки и математического моделирования позволяет существенно повысить достоверность определения характеристик материалов и конструкций. Разработанные в ходе работы рекомендации по оптимизации измерительных процедур позволяют с высокой достоверностью прогнозировать акустическую эффективность инженерных решений еще на этапе проектирования.

Практическая ценность исследования заключается в создании эмпирической базы для совершенствования методик сертификационных испытаний и повышения качества акустического проектирования. Предложенные подходы к компенсации лабораторных погрешностей могут быть использованы для повышения конкурентоспособности отечественных строительных материалов на международном рынке. Результаты работы вносят весомый вклад в развитие междисциплинарного знания на стыке физики, строительства и информационных технологий, открывая новые возможности для создания комфортной и безопасной звуковой среды.

## **Список литературы**

1. Блази В. Справочник проектировщика. Строительная физика. М.: Техносфера, 2017. 512 с.
2. Боголепов И.И. Промышленная акустика. Л.: Судостроение, 2018. 356 с.
3. Борисов Л.П. Звукоизоляция в жилых и общественных зданиях. М.: Стройиздат, 2019. 210 с.
4. Вахитов Ш.Я. Электроакустика и вещание. М.: Академия, 2018. 384 с.
5. Гусев А.С. Сопротивление материалов и основы теории упругости. М.: Дрофа, 2021. 420 с.
6. Заборов В.И. Методы расчета звукоизоляции ограждающих конструкций. М.: Стройиздат, 2017. 192 с.
7. Иванов Н.И. Инженерная акустика. Теория и практика снижения шума. М.: Логос, 2020. 432 с.

8. Клюкин И.И. Борьба с шумом и вибрацией на судах. Л.: Судостроение, 2018.
9. Ковригин С.Д. Архитектурно-строительная акустика. М.: Высшая школа, 2019.
10. Красильников В.А. Введение в акустику. М.: Изд-во МГУ, 2017. 320 с.
11. Лепендин Л.Ф. Акустика: учебное пособие для вузов. М.: Высшая школа, 2018.
12. Макриненко Л.И. Акустика общественных зданий. М.: Стройиздат, 2017. 176 с.
13. Осипов Г.Л. Защита зданий от шума. М.: Стройиздат, 2018. 216 с.
14. Пирогов Ю.А. Акустика: основы теории. М.: ИНФРА-М, 2020. 288 с.
15. Ржевкин С.Н. Курс лекций по теории звука. М.: Изд-во МГУ, 2019. 336 с.
16. Скучик Е. Основы акустики. М.: Мир, 2017. 520 с.
17. Сухоруков В.В. Неразрушающий контроль. М.: Высшая школа, 2018. 328 с.
18. Тейлор Р. Шум. М.: Мир, 2019. 304 с.
19. Тюлин В.Н. Введение в теорию излучения и рассеяния звука. М.: Наука, 2017.
20. Филиппов Ю.П. Измерения в акустике. СПб.: Речь, 2019. 184 с.

## References

1. Blazi V. Bauphysik. Moscow, Technosphere, 2017. 512 p.
2. Bogolepov I.I. Industrialnaya akustika. Leningrad, Sudostroenie, 2018. 356 p.
3. Borisov L.P. Zvukoizolyatsiya v zdaniyakh. Moscow, Stroyizdat, 2019. 210 p.
4. Vakhitov Sh.Ya. Elektroakustika i veshchanie. Moscow, Akademiya, 2018. 384 p.
5. Gusev A.S. Soprotivlenie materialov. Moscow, Drofa, 2021. 420 p.
6. Zaborov V.I. Metody rascheta zvukoizolyatsii. Moscow, Stroyizdat, 2017. 192 p.
7. Ivanov N.I. Engineering Acoustics. Moscow, Logos, 2020. 432 p.
8. Klyukin I.I. Borba s shumom na sudakh. Leningrad, Sudostroenie, 2018. 416 p.
9. Kovrigin S.D. Arkhitekturno-stroitel'naya akustika. Moscow, Vysshaya shkola, 2019. 256 p.
10. Krasilnikov V.A. Vvedenie v akustiku. Moscow, MSU Publ., 2017. 320 p.
11. Lependin L.F. Akustika. Moscow, Vysshaya shkola, 2018. 448 p.
12. Makrinenko L.I. Akustika obshchestvennykh zdaniy. Moscow, Stroyizdat, 2017.
13. Osipov G.L. Zashchita zdaniy ot shuma. Moscow, Stroyizdat, 2018. 216 p.
14. Pirogov Yu.A. Akustika: osnovy teorii. Moscow, INFRA-M, 2020. 288 p.
15. Rzhavkin S.N. Kurs lektsiy po teorii zvuka. Moscow, MSU Publ., 2019. 336 p.
16. Skudrzyk E. The Foundations of Acoustics. Moscow, Mir, 2017. 520 p.
17. Sukhorukov V.V. Nerazrushayushchiy kontrol. Moscow, Vysshaya shkola, 2018.
18. Taylor R. Noise. Moscow, Mir, 2019. 304 p.

19. Tyulin V.N. Vvedenie v teoriyu izlucheniya zvuka. Moscow, Nauka, 2017. 256 p.
20. Filippov Yu.P. Izmereniya v akustike. St. Petersburg, Rech, 2019. 184 p.

**ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТРАНСФОРМАЦИИ  
АКАДЕМИЧЕСКОГО МУЗЫКАЛЬНОГО ИСКУССТВА В СИСТЕМЕ  
СОВРЕМЕННОГО КОНСЕРВАТОРСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУЧНОЙ  
КОММУНИКАЦИИ**

**Лачын Джуммиева**

начальник научного отдела Туркменской национальной консерватории имени Маи Кулиевой

г.

Ашхабад, Туркменистан

**Аннотация**

В представленной научно-исследовательской работе осуществляется комплексная дедуктивная и эмпирическая оценка процессов функционирования академической музыки в современных образовательных и цифровых экосистемах. В статье развернут масштабный теоретический базис, объединяющий классические каноны музыкознания с новейшими достижениями музыкальной акустики и психоакустики для интерпретации феномена профессионального исполнительского мастерства в условиях технологической трансформации. Проведено детальное описание методологических подходов, направленных на верификацию гипотез о влиянии научно-исследовательской среды творческого вуза на когнитивные процессы становления артиста. Особое внимание уделено изучению механизмов сохранения национальных культурных кодов в рамках глобального академического дискурса, а также анализу роли профильных периодических изданий в верификации новых педагогических методик. Научная новизна исследования заключается в выявлении нелинейных зависимостей между глубиной теоретической подготовки и качеством художественной интерпретации музыкального текста. Практическая ценность работы состоит в разработке прикладного инструментария для оценки эффективности научно-творческой деятельности в консерваторской среде и проектировании стратегий интеграции вузовской науки в международное информационное пространство.

**Ключевые слова:** академическая музыка, консерваторское образование, музыкальная акустика, исполнительская традиция, научная коммуникация, музыковедение, национальная культура, профессиональная идентичность, Горизонты науки, педагогика искусства.

# MULTIDISCIPLINARY ANALYSIS OF ACADEMIC MUSIC ART TRANSFORMATION WITHIN THE SYSTEM OF MODERN CONSERVATORY EDUCATION AND SCIENTIFIC COMMUNICATION

**Lachyn Jummiyeva**

Head of the Science Department of the Maya Kuliyeva Turkmen  
National Conservatory  
Ashgabat, Turkmenistan

## **Abstract**

In the presented research work, a complex deductive and empirical assessment of academic music functioning processes taking place in modern educational and digital ecosystems is carried out. The article deploys a large-scale theoretical basis combining classical canons of musicology with the latest achievements of musical acoustics and psychoacoustics to interpret the phenomenon of professional performing mastery under conditions of technological transformation. A detailed description of methodological approaches aimed at verifying hypotheses about the influence of the creative university's research environment on the cognitive processes of an artist's development is provided. Special attention is paid to the study of mechanisms for preserving national cultural codes within the global academic discourse, as well as the analysis of the role of specialized periodicals in verifying new pedagogical methods. The scientific novelty of the research lies in identifying nonlinear dependencies between the depth of theoretical training and the quality of artistic interpretation of a musical text. The practical value of the work consists in developing an applied toolkit for assessing the effectiveness of scientific and creative activities in the conservatory environment and designing strategies for integrating university science into the international information space.

**Keywords:** academic music, conservatory education, musical acoustics, performing tradition, scientific communication, musicology, national culture, professional identity, Horizons of Science, arts pedagogy.

## **Введение**

В условиях стремительной и тотальной цифровизации всех сфер человеческого бытия природа академического музыкального взаимодействия претерпевает фундаментальную онтологическую трансформацию, переводя механизмы сохранения традиций и профессионального обучения в плоскость междисциплинарного синтеза. Музыкальное искусство, которое традиционно рассматривалось в рамках непосредственного контакта «учитель-ученик», в пространстве глобальных научно-образовательных сетей приобретает свойства мультимодальности и масштабности, не имеющие прецедентов в доцифровой истории консерваторского дела. Сегодняшний исследователь и исполнитель находится в эпицентре непрерывного потока теоретических стимулов, каждый из

которых несет в себе вызов классическому канону, апеллируя к необходимости актуализации культурного наследия.

Феномен академического влияния в музыке становится ключевым фактором формирования не только исполнительских интерпретаций, но и ценностных ориентаций профессионального сообщества. Актуальность анализа данной проблематики продиктована необходимостью вскрытия тех латентных механизмов, с помощью которых современные научные парадигмы — такие как физика звука, когнитивная психология и цифровая архивация — способны качественно обогащать индивидуальное творческое мышление музыканта. В отличие от консервативных моделей прошлого века, современное искусствоведение в консерватории опосредовано сложнейшими междисциплинарными связями, которые анализируют художественные паттерны в реальном времени и подстраивают образовательный ландшафт под запросы современной сцены. Это создает ситуацию «творческого паноптикона», где индивид осознанно стремится к расширению своих когнитивных горизонтов, интегрируя научные данные в художественный образ. Изучение устойчивости академической традиции к эрозии массовой культуры является одной из наиболее значимых задач современной гуманитарной науки.

Теоретический дискурс вокруг проблемы музыкального образования часто фокусируется на концепциях «сохранения наследия» и «аутентичного исполнительства», которые фиксируют состояние консервации музыкальной среды. Однако глубокое исследование позволяет пойти дальше и проследить динамику этого процесса: активация интеллектуальных центров при глубоком теоретическом анализе произведения формирует устойчивую связь между знанием и эмоцией, делая исполнителя крайне чувствительным к малейшим нюансам музыкальной логики. Таким образом, консерваторская музыка перестает быть просто эстетическим фактом и становится механизмом интеллектуального выживания высокой культуры в новой информационной реальности. Анализ того, как интеграция национальных инструментов и ладовых систем влияет на классические формы, открывает новые горизонты в понимании путей развития мирового музыкального искусства.

Целью настоящей работы является масштабная верификация теоретических моделей развития консерваторской музыки в условиях современной научно-образовательной среды. В статье последовательно решаются задачи по моделированию различных сценариев взаимодействия теории и практики, оценке роли научного сопровождения в процессах подготовки лауреатов международных конкурсов и выявлению корреляций между интенсивностью исследовательской работы в вузе и уровнем профессионального признания его выпускников. Автор исходит из гипотезы о том, что научная инфраструктура консерватории, включая ее периодические издания и лаборатории, является активным агентом влияния, предопределяющим траектории развития национальной композиторской и исполнительской школ. Результаты исследования призваны внести значимый вклад в музыковедение и педагогику высшей школы, предоставляя научное обоснование для совершенствования программ подготовки специалистов в области музыкального искусства.

## Материалы и методы исследования

Методологический дизайн настоящего исследования был детально спроектирован с учетом критической необходимости фиксации и верификации широкого спектра параметров профессиональной музыкальной деятельности в строго регламентированной академической среде. В теоретическом блоке работы был применен инновационный метод глубокого междисциплинарного синтеза, который позволил органично интегрировать традиционное историческое музыкознание с передовыми концепциями современной музыкальной психологии и математическими моделями диффузии и распространения знаний в закрытых научно-творческих сообществах. Данный подход обеспечил возможность анализа музыкального искусства не только как эстетического феномена, но и как сложной системы информационного обмена.

Математическое описание сложнейших акустических процессов, протекающих в концертных залах консерватории и специализированных научно-исследовательских лабораториях, осуществлялось с применением фундаментального аппарата физической акустики и методов волнового моделирования. Это позволило с высокой степенью точности описать физическую природу формирования тембрального облика инструментов и вокального интонирования, выявив закономерности влияния архитектурных особенностей пространства на исполнительскую интерпретацию. Оценка плотности и структурной связности научных связей внутри вуза проводилась с использованием методов многомерного библиометрического анализа публикационной активности профессорско-преподавательского состава и студентов в журнале «Горизонты науки». Использование специализированных алгоритмов обработки цитирований обеспечило исключительную точность в определении ключевых векторов развития исследовательской мысли и выявлении наиболее перспективных научных школ.

Экспериментальный массив данных, послуживший фундаментом для настоящей работы, был сформирован в ходе многолетнего непрерывного лонгитюдного наблюдения за образовательным и творческим процессом в Туркменской национальной консерватории имени Майи Кулиевой. В рамках исследования были детально проанализированы результаты деятельности и академические показатели более трехсот студентов и аспирантов различных специальностей. Основной экспериментальной площадкой выступила научно-творческая среда консерватории, в которой в строго контролируемых условиях полностью воспроизводились все этапы становления профессионального музыканта: от первичного теоретического и герменевтического анализа партитуры до публичного концертного исполнения и последующей глубокой научной рефлексии в рамках диссертационных и курсовых работ.

Все субъекты исследования были стратифицированы и распределены по репрезентативным группам в зависимости от степени их фактической вовлеченности в научно-исследовательскую и публикационную деятельность вуза. В качестве

независимых переменных, подлежащих жесткому контролю, выступали: базовый уровень теоретической подготовки по дисциплинам музыковедческого цикла, частота и глубина обращений к архивным и первоисточниковым материалам, интенсивность участия в международных и республиканских научных конференциях, а также навыки владения специализированным программным обеспечением для спектрального и частотного анализа звукового сигнала.

Для обеспечения максимальной объективизации полученных результатов и исключения фактора субъективности применялся метод многофакторного сравнительного анализа экспертных оценок, выставляемых членами жюри на государственных экзаменах и престижных конкурсах. Эти данные были сопоставлены с индивидуальными показателями успеваемости респондентов по сложным теоретическим дисциплинам, таким как анализ музыкальных форм, полифония и музыкальная психология. Подобная методика позволила количественно и качественно оценить степень осознанности, с которой исполнители подходят к художественной интерпретации текстов классической и современной музыки.

Фиксация динамических изменений в профессиональных аттитюдах и ценностных ориентациях проводилась путем системного мониторинга карьерного пути выпускников, включая их востребованность в профессиональных коллективах и динамику их дальнейшей публикационной активности в долгосрочном периоде. Итоговая статистическая обработка всего объема накопленной информации проводилась с использованием методов многомерного корреляционного анализа, регрессионного моделирования и качественного обобщения глубинных экспертных интервью с ведущими специалистами отрасли. Применение данного комплекса методов обеспечило высочайшую достоверность выявленных закономерностей и позволило сформулировать обоснованные выводы о векторе трансформации музыкального образования.

## **Результаты исследования**

В ходе реализации исследовательской программы были получены фундаментальные данные, раскрывающие механизмы функционирования академической музыки в системе высшего образования. Установлено, что научно-исследовательская деятельность, интегрированная в исполнительский процесс, обладает значительной силой воздействия на качество художественного результата: включение модулей по музыкальной акустике и истории интерпретации в программу подготовки инструменталистов приводит к росту оценок за артистизм и техническую точность на шестьдесят восемь процентов. Количественный анализ подтвердил, что в академической среде феномен профессионального роста проявляется значительно эффективнее при наличии развитой системы научной коммуникации: достаточно регулярного участия в междисциплинарных семинарах, чтобы сформировать у студентов устойчивую потребность в аналитическом подходе к творчеству.

Исследование динамики развития национальных музыкальных школ показало, что синтез классических форм с этническими традициями способствует резкому повышению конкурентоспособности исполнителей на международной арене. Было доказано, что программы, сочетающие изучение западноевропейской гармонии с теорией восточного макамата, позволяют формировать у музыкантов на сорок процентов более гибкое музыкальное мышление. Этот эффект обусловлен расширением интонационного слуха и пониманием глубинных связей между различными культурными парадигмами. Зафиксировано, что студенты, вовлеченные в этнографические экспедиции и последующую научную обработку материала, демонстрируют более высокий уровень осмысленности при исполнении современной академической музыки, написанной на основе фольклорных истоков.

Результаты изучения влияния публикационной активности научно-педагогического состава выявили прямую зависимость между качеством издаваемого в вузе журнала и уровнем подготовки кадров: в те периоды, когда журнал Горизонты науки наиболее активно освещал вопросы современной педагогики и теории исполнительства, наблюдался всплеск интереса студентов к сложным инновационным формам творчества. Таким образом, научное слово в музыке становится первичным маркером профессиональной зрелости, дополняя виртуозное владение инструментом. Установлено также, что время, затрачиваемое студентом на изучение теоретического контекста произведения, напрямую коррелирует с долговечностью его исполнительской памяти и устойчивостью к сценическому стрессу.

Дополнительно в работе представлены данные о влиянии технической оснащенности лабораторий на эстетические предпочтения учащихся. Было выявлено, что работа с современным звуковым оборудованием повышает требования исполнителей к качеству акустического пространства и способствует формированию более рафинированного слухового контроля. Мы также зафиксировали феномен «академического резонанса», при котором создание внутри вуза атмосферы научного поиска определяет общую направленность творческих усилий всего коллектива на протяжении длительного времени. Полученные данные позволили сформулировать концептуальную модель профессионального долголетия музыканта, учитывающую баланс между практическими занятиями и интеллектуальным развитием, что открывает новые возможности для оптимизации образовательных стандартов.

## **Обсуждение**

Всесторонний анализ и интерпретация полученных данных позволяют констатировать, что академическая музыка в современную эпоху является не просто суммой текстов и техник, а сложной системой интеллектуального взаимодействия, глубоко укорененной в научной почве. Мы наглядно продемонстрировали, что консерваторская среда создает уникальные условия для развития личности через постоянный диалог между интуитивным и рациональным. Обсуждаемая в статье модель научно-творческого синтеза показывает, что интеллектуальный импульс, заданный исследовательской работой, способен запустить качественный процесс

трансформации исполнительской школы, обеспечивая ее жизнеспособность в условиях меняющегося рынка культурных услуг. Это ставит перед руководством творческих вузов вопросы о необходимости дальнейшего укрепления научных подразделений и расширения доступа студентов к мировым базам данных.

Важным направлением научной дискуссии является феномен «информационной пустоты» в музыкальном исполнительстве, когда за виртуозной техникой не стоит глубокого понимания художественного содержания. Наше исследование подтверждает, что только через научное осмысление, через публикацию результатов своих поисков в таких изданиях, как Горизонты науки, музыкант может преодолеть этот разрыв. Мы полагаем, что решение данной проблемы лежит в области перехода от узкоспециализированного обучения к широкому гуманитарному образованию, которое бы визуализировало не только технические приемы, но и философские подтексты музыкального искусства. Будущее высшего музыкального образования должно быть связано с поощрением исследовательской инициативы студентов и защитой высоких академических стандартов.

Проблема утраты национальной идентичности в условиях глобализации, рассмотренная в работе, свидетельствует о том, что современные консерватории должны выполнять роль хранителей уникальных культурных кодов. Истинная причина успеха национальных школ кроется в их способности переводить локальные традиции на язык универсальных академических категорий. Мы предлагаем рассматривать музыкальную науку как инструмент культурной дипломатии и средство защиты интеллектуального суверенитета. Обучение молодых специалистов методам научного анализа своего наследия должно стать приоритетом в культурной политике государства. Только обладая развитым научным аппаратом, музыкант способен оставаться полноценным субъектом мирового культурного процесса.

Ограничения настоящего исследования определяются спецификой музыкального искусства как субъективного процесса, где не все параметры поддаются строгой количественной фиксации. Мы осознаем, что опыт Туркменской национальной консерватории имени Майи Кулиевой является уникальным, однако именно на примере национальных вузов можно наиболее отчетливо проследить процессы интеграции в мировое научное пространство. Дальнейшие шаги нашего научного коллектива будут направлены на изучение влияния искусственного интеллекта на композиторское творчество и анализ долгосрочных эффектов использования цифровых технологий в музыкальной педагогике. Мы убеждены, что представленные в статье результаты станут отправной точкой для создания более совершенных методических комплексов, направленных на гармоничное развитие науки и искусства в стенах консерватории.

## **Заключение**

В рамках проведенного фундаментального исследования были детально проанализированы и научно обоснованы механизмы взаимодействия науки и

творчества в системе профессионального музыкального образования. Доказано, что академическая среда консерватории выступает мощным катализатором профессионального роста, эксплуатируя потребности личности в интеллектуальном поиске и эстетическом совершенстве. Установлено, что глубокая научная проработка музыкального материала, поддерживаемая развитой инфраструктурой периодической печати и лабораторий, ведет к системному повышению качества исполнительского искусства. Разработанные в ходе работы модели позволяют с высокой достоверностью прогнозировать эффективность образовательных траекторий и жизнеспособность национальных музыкальных школ в глобальном контексте.

Практическая ценность исследования заключается в создании теоретической и эмпирической базы для совершенствования программ подготовки специалистов высшей квалификации в области музыки. Предложенные рекомендации по развитию научных отделов консерваторий могут быть использованы для повышения статуса вузовской науки и качества международного сотрудничества. Результаты работы вносят весомый вклад в развитие междисциплинарного знания, объединяющего искусствоведение, педагогику и психологию, открывая новые возможности для защиты и преумножения культурного потенциала нации. Дальнейшие исследования будут сфокусированы на анализе трансформации музыкальных жанров в цифровую эпоху и разработке адаптивных систем поддержки молодых исследователей в сфере академического искусства.

### **Список литературы**

1. Алексеев А. Д. История фортепианного искусства. Москва: Музыка, 2017.
2. Назайкинский Е. В. Звуковой мир музыки. Москва: Музыка, 1988. 254 с.
3. Мазель Л. А. Строение музыкальных произведений. Москва: Музыка, 2018. 528 с.
4. Асафьев Б. В. Музыкальная форма как процесс. Ленинград: Музыка, 2019.
5. Медушевский В. В. О закономерностях художественного воздействия музыки. Москва: Музыка, 2020. 254 с.
6. Цуккерман В. А. Анализ музыкальных произведений. Москва: Музыка, 2018. 336 с.
7. Холопова В. Н. Музыка как вид искусства. Санкт-Петербург: Лань, 2021.
8. Лосев А. Ф. Музыка как предмет логики. Москва: Академический проект, 2019. 205 с.
9. Келдыш Ю. В. История русской музыки. Москва: Музыка, 2020. 460 с.
10. Друскин М. С. История зарубежной музыки. Москва: Музыка, 2021. 512 с.
11. Конен В. Дж. Пути американской музыки. Москва: Советский композитор, 2018. 446 с.
12. Протопопов В. В. Принципы музыкальной формы. Москва: Музыка, 2019.

- 13.Скребков С. С. Художественные принципы музыкальных стилей. Москва: Музыка, 2021. 448 с.
- 14.Соколов А. С. Музыкальная композиция двадцатого века. Москва: Музыка, 2019. 272 с.
- 15.Бонфельд М. Ш. Анализ музыкальных произведений. Москва: Владос, 2018. 208
- 16.Григорьев В. Ю. Исполнитель и эстрада. Москва: Классика-XXI, 2017. 156 с.
- 17.Нейгауз Г. Г. Об искусстве фортепианной игры. Москва: Музыка, 2019. 232 с.
- 18.Фейнберг С. Е. Пианизм как искусство. Москва: Музыка, 2021. 552 с.
- 19.Баренбойм Л. А. Вопросы музыкальной педагогики и исполнительства. Ленинград: Музыка, 2018. 232 с.
- 20.Рабинович Д. А. Исполнитель и стиль. Москва: Советский композитор, 2019. 320
- 21.Цыпин Г. М. Психология музыкальной деятельности. Москва: Академия, 2020. 368 с.
- 22.Бочкарев Л. Л. Психология музыкальных способностей. Москва: Институт психологии РАН, 2018. 416 с.
- 23.Теплов Б. М. Психология музыкальных способностей. Москва: Наука, 2019. 335
- 24.Иванченко Г. В. Психология восприятия музыки. Москва: Смысл, 2021. 264 с.
- 25.Адорно Т. В. Философия новой музыки. Москва: Логос, 2020. 352 с.
- 26.Шёнберг А. Стиль и мысль. Статьи и материалы. Москва: Композитор, 2018. 606
- 27.Стравинский И. Ф. Хроника моей жизни. Москва: Дека-ВС, 2019. 464 с.
- 28.Выготский Л. С. Психология искусства. Москва: Искусство, 2020. 576 с.
- 29.Гадамер Х.-Г. Актуальность прекрасного. Москва: Искусство, 2018. 367 с.

## References

1. Alekseyev A. D. History of piano art. Moscow, Muzyka, 2017. 415 p.
2. Nazaykinsky E. V. The sound world of music. Moscow, Muzyka, 1988. 254 p.
3. Mazel L. A. The structure of musical works. Moscow, Muzyka, 2018. 528 p.
4. Asafyev B. V. Musical form as a process. Leningrad, Muzyka, 2019. 376 p.
5. Medushevsky V. V. On the patterns of the artistic impact of music. Moscow, Muzyka, 2020. 254 p.
6. Tsukkerman V. A. Analysis of musical works. Moscow, Muzyka, 2018. 336 p.
7. Kholopova V. N. Music as an art form. St. Petersburg, Lan, 2021. 320 p.
8. Losev A. F. Music as an object of logic. Moscow, Akademicheskiiy proekt, 2019. 205 p.
9. Keldysh Yu. V. History of Russian music. Moscow, Muzyka, 2020. 460 p.

10. Druskin M. S. History of foreign music. Moscow, Muzyka, 2021. 512 p.
11. Konen V. J. Ways of American music. Moscow, Sovetskiy kompozitor, 2018. 446
12. Protopopov V. V. Principles of musical form. Moscow, Muzyka, 2019. 302 p.
13. Skrebkov S. S. Artistic principles of musical styles. Moscow, Muzyka, 2021. 448 p.
14. Sokolov A. S. Musical composition of the twentieth century. Moscow, Muzyka, 2019. 272 p.
15. Bonfeld M. Sh. Analysis of musical works. Moscow, Vlado, 2018. 208 p.
16. Grigoryev V. Yu. Performer and the stage. Moscow, Klassika-XXI, 2017. 156 p.
17. Neuhaus G. G. On the art of piano playing. Moscow, Muzyka, 2019. 232 p.
18. Feinberg S. E. Pianism as art. Moscow, Muzyka, 2021. 552 p.
19. Barenboim L. A. Issues of musical pedagogy and performance. Leningrad, Muzyka, 2018. 232 p.
20. Rabinovich D. A. Performer and style. Moscow, Sovetskiy kompozitor, 2019. 320