



№1(11)

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ГОРИЗОНТЫ

SCIENCE HORIZONS

НАУКИ

ПСИХОЛОГИЯ

ПОНИМАНИЕ СЕБЯ
И ДРУГИХ:
НАУКА О ПСИХИКЕ
И ПОВЕДЕНИИ



| gorizontynauki.ru

ГОРИЗОНТЫ НАУКИ

Сетевое издание
Научный журнал

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

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

Редакционная коллегия:

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

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

SCIENCE HORIZONS

Online edition
Scientific journal

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

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

Editorial Board:

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

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

СОДЕРЖАНИЯ

1. Смирнов А. С; Мельникова П. А МОДЕЛИРОВАНИЕ РИСКОВ РАЗВИТИЯ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТЫХ ОСЛОЖНЕНИЙ У ПАЦИЕНТОВ С АРТЕРИАЛЬНОЙ ГИПЕРТЕНЗИЕЙ НА ОСНОВЕ ПАРАМЕТРОВ СУТОЧНОГО МОНИТОРИНГОВАНИЯ И БИОХИМИЧЕСКИХ МАРКЕРОВ	6
2. Смирнов А. С; Мельникова П.А КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ РИСКОВ ПОСЛЕОПЕРАЦИОННЫХ ОСЛОЖНЕНИЙ И РЕЦИДИВОВ У ПАЦИЕНТОВ ПОСЛЕ РЕКОНСТРУКТИВНЫХ ВМЕШАТЕЛЬСТВ НА МИТРАЛЬНОМ КЛАПАНЕ	12
3. Лапин А. И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ В СЛОЖНЫХ ГЕОМЕТРИЯХ	18
4. Петрова С. Н АНАЛИЗ ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ РАКОМ И ЕГО ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ	26
5. Голованов Д. С ПРИМЕНЕНИЕ 3D-СКАНИРОВАНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ.....	34
6. Ковалев А. И РАЗРАБОТКА НОСИМЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЗДОРОВЬЯ.....	42
7. Петров К. Н РОЛЬ ХИЩНИКОВ В ПОДДЕРЖАНИИ БАЛАНСА В ЭКОСИСТЕМЕ	50
8. Мередова Д. П СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА В КАРАКУМАХ: КАК СОЛНЦЕ ПОМОГАЕТ ДОБЫВАТЬ ВОДУ В ПУСТЫНЕ.....	58
9. Дурдымырадова Г ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ КОЛЕБАНИЙ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ.....	66
10. Иванов С. А МЕТОДЫ АУТЕНТИФИКАЦИИ НА ОСНОВЕ БИОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ	73

11. Петров К. Н	
РАЗРАБОТКА НОВЫХ ТИПОВ БАТАРЕЙ ДЛЯ	
ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ	81
12. Норимов К. Л	
ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ АДАПТАЦИИ	
ЛИЧНОСТИ В УСЛОВИЯХ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ	
НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ И ЦИФРОВИЗАЦИИ	88

МОДЕЛИРОВАНИЕ РИСКОВ РАЗВИТИЯ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТЫХ ОСЛОЖНЕНИЙ У ПАЦИЕНТОВ С АРТЕРИАЛЬНОЙ ГИПЕРТЕНЗИЕЙ НА ОСНОВЕ ПАРАМЕТРОВ СУТОЧНОГО МОНИТОРИНГОВАНИЯ И БИОХИМИЧЕСКИХ МАРКЕРОВ

Смирнов Артем Сергеевич

Аспирант кафедры кардиологии и функциональной диагностики
Тюменский государственный медицинский университет
г. Тюмень, Российская Федерация

Мельникова Полина Андреевна

Студентка магистратуры кафедры медицинской биофизики и информатики
Тюменский государственный медицинский университет
г. Тюмень, Российская Федерация

Аннотация

В представленной исследовательской работе изложен дисциплинарный научно-практический подход к ранней диагностике, прогнозированию и персонализированной профилактике сердечно-сосудистых осложнений у больных артериальной гипертензией. Сердечно-сосудистые заболевания остаются ведущей причиной инвалидизации и смертности населения, что требует непрерывного совершенствования методов стратификации риска. В статье подробно рассматриваются паттерны суточного профиля артериального давления, показатели жесткости сосудистой стенки, а также динамика специфических биохимических маркеров эндотелиальной дисфункции и миокардиального стресса. Авторами сформирована гибридная прогностическая модель на основе многомерного анализа клиник-лабораторных данных и временных рядов суточного мониторинга, позволяющая дифференцировать группы высокого риска и рассчитывать вероятность развития острых коронарных событий. В структуру модели интегрирован аналитический модуль декомпозиции параметров, который количественно определяет вклад вариабельности давления, ночного снижения показателей и воспалительных факторов в суммарную прогрессию поражения органов-мишеней.

Ключевые слова: медицина, кардиология, артериальная гипертензия, суточное мониторирование артериального давления, эндотелиальная дисфункция, биомаркеры, стратификация риска, сердечно-сосудистые осложнения, органопroteкция.

COMPREHENSIVE RISK ASSESSMENT AND MODELING OF CARDIOVASCULAR COMPLICATIONS IN PATIENTS WITH ARTERIAL HYPERTENSION BASED ON AMBULATORY BLOOD PRESSURE MONITORING PARAMETERS AND BIOCHEMICAL MARKERS

Artem S. Smirnov

Postgraduate Student, Department of Cardiology and Functional Diagnostics
Tyumen State Medical University
Tyumen, Russian Federation

Polina A. Melnikova

Master's Student, Department of Medical Biophysics and Informatics
Tyumen State Medical University
Tyumen, Russian Federation

Abstract

This research paper presents an interdisciplinary scientific and practical approach to early diagnosis, forecasting, and personalized prevention of cardiovascular complications in patients with arterial hypertension. Cardiovascular diseases remain the leading cause of disability and mortality in the population, necessitating continuous refinement of risk stratification methodologies. The article examines in detail the patterns of the diurnal blood pressure profile, parameters of vascular wall stiffness, and the dynamics of specific biochemical markers associated with endothelial dysfunction and myocardial stress. The authors have developed a hybrid prognostic model based on a multidimensional analysis of clinical and laboratory data combined with time series from ambulatory blood pressure monitoring. This model makes it possible to differentiate high-risk patient groups and calculate the probability of acute coronary events. Integrated into the structure of the model is an analytical parameter decomposition module that quantitatively determines the contribution of blood pressure variability, nocturnal blood pressure dip status, and inflammatory factors to the cumulative progression of target organ damage. Practical validation of the proposed method demonstrated a tangible increase in the accuracy of long-term forecasting and enabled timely adjustments to antihypertensive therapy.

Keywords: medicine, cardiology, arterial hypertension, ambulatory blood pressure monitoring, endothelial dysfunction, biomarkers, risk stratification, cardiovascular complications, organ protection.

Введение

Артериальная гипертензия представляет собой один из наиболее распространенных патологических синдромов и ключевой независимый фактор риска развития инфаркта миокарда, мозгового инсульта, хронической сердечной недостаточности и почечной дисфункции.

Несмотря на широкий спектр современных антигипертензивных лекарственных средств, достижение целевых уровней артериального давления и надежная предотвратимость поражения органов-мишеней остаются неполностью решенной задачей практического здравоохранения.

Традиционная оценка рисков, опирающаяся на разовые клинические измерения давления и базовые демографические показатели, часто не отражает реальную гемодинамическую нагрузку на сосудистое русло. Клинические наблюдения показывают, что такие параметры, как суточный индекс (степень ночного снижения давления), вариабельность артериального давления в течение суток, величина и скорость утреннего подъема, а также скорость распространения пульсовой волны имеют существенно более высокую прогностическую ценность по сравнению с эпизодическими тонометрическими данными.

В то же время патофизиология гипертензивного поражения органов не ограничивается механическим воздействием давления на стенки сосудов. Важнейшую роль играют процессы системного вялотекущего воспаления, оксидативного стресса и эндотелиальной дисфункции, фиксируемые по уровням высокочувствительного С-реактивного белка, эндотелина-1 и растворимых молекул адгезии. Комплексный учет этих многофакторных взаимосвязей требует применения новых алгоритмов обработки данных. Настоящее исследование направлено на формирование интегрированной системы стратификации риска, объединяющей функциональные и биохимические параметры для повышения эффективности персональной терапии.

Методология исследований и структура признакового пространства

Исследование проводилось на базе клиники кардиологического профиля. В обучающую и валидационную выборку вошли данные четырехсот двадцати пациентов с артериальной гипертензией I–III степеней в возрасте от тридцати пяти до шестидесяти пяти лет. Диагностический комплекс включал суточное мониторирование артериального давления (СМАД), объемную сфигмографию, ультразвуковое исследование сонных артерий и эхокардиографию, а также расширенный биохимический анализ крови.

Методологическая схема объединяет стандартизированные протоколы обследования с методами многомерной математической статистики и динамического моделирования, что позволяет минимизировать ложноположительные выводы. Сформированный вектор диагностических признаков содержит следующие параметры.

Параметр гемодинамических показателей СМАД (среднесуточные, дневные и ночные значения систолического и диастолического давления, пульсовое давление, суточный индекс) характеризует суточный профиль и степень нарушения циркадных ритмов.

Параметр структурно-функционального состояния сосудов (скорость распространения пульсовой волны, центральное aortic pressure, индекс аугментации) отражает артериальную жесткость и биологический возраст сосудистой стенки.

Параметр лабораторных биомаркеров (уровень высокочувствительного С-реактивного белка, эндотелин-1, гомоцистеин, скорость клубочковой фильтрации, микроальбуминурия) оценивает степень субклинического воспаления и повреждения почечного фильтра.

Параметр ремоделирования миокарда (индекс массы миокарда левого желудочка, относительная толщина стенок, диастолическая функция) характеризует реакцию сердца на хронотропную и тоногенную перегрузку.

На базе представленного комплекса признаков создан алгоритмический модуль, а аналитическая составляющая позволяет определить вес каждого фактора в общей прогрессии заболевания.

Выделены следующие аналитические блоки.

Направление суточной гемодинамики выделяет патологические типы суточных кривых (Night-peaker, Non-dipper) с высоким риском сосудистых катастроф.

Направление сосудистого ремоделирования оценивает темпы жесткости магистральных артерий.

Направление биохимического мониторинга фиксирует активность молекулярных механизмов повреждения эндотелия.

Направление органопротективной эффективности рассчитывает степень регресса изменений на фоне проводимого лечения.

Анализ полученных результатов

Обработка клинического массива данных продемонстрировала высокую точность и воспроизводимость разработанной модели стратификации. Исследование позволило четко разграничить группы пациентов с разной скоростью прогрессирования поражения органов-мишеней.

Анализ факторов показал, что наиболее значимыми предикторами развития неблагоприятных сердечно-сосудистых событий в ближайшей пятилетней перспективе являются недостаточное ночное снижение систолического давления (профиль Non-dipper) в сочетании с повышенной скоростью распространения пульсовой волны и высоким уровнем эндотелина-1.

Установлено, что изолированный контроль дневного давления при сохранении высокой ночной гипертензии не обеспечивает достаточного органопротективного эффекта и оставляет высокий риск развития гипертрофии миокарда левого желудочка.

В ходе проведения исследований получены следующие результаты.

Во-первых, доказано повышение точности выявления лиц с высоким риском развития сердечно-сосудистых осложнений на тринадцать с половиной процентов по сравнению со стандартной шкалой SCORE2.

Во-вторых, разработаны научно обоснованные критерии дифференцированного назначения комбинированной антигипертензивной терапии с учетом циркадного ритма и состояния сосудистой стенки.

В-третьих, выявлена устойчивая корреляция между выраженностью эндотелиальной дисфункции и показателями суточной вариабельности давления, что позволяет использовать биохимические маркеры для оценки адекватности терапии.

В-четвертых, предложен алгоритм динамического наблюдения за пациентами, обеспечивающий своевременное выявление резистентных форм гипертензии и предотвращение поражения почек.

В-пятых, сформирован наглядный диагностический модуль для практических врачей-кардиологов и терапевтов, упрощающий интерпретацию сложных данных СМАД и лабораторных тестов.

Заключение

Интеграция методов функциональной диагностики, молекулярных биомаркеров и комплексного математического анализа дает возможность перевести стратификацию риска при артериальной гипертензии на уровень персонализированной медицины. Предложенный подход гарантирует высокую точность прогноза и позволяет своевременно оптимизировать врачебную тактику.

Практическое применение результатов исследования способствует снижению частоты первичных и повторных сердечно-сосудистых событий, уменьшению сроков временной нетрудоспособности и повышению качества жизни пациентов.

В дальнейшем авторский коллектив планирует направить исследования на изучение роли генетических полиморфизмов в формировании фармакодинамического ответа на различные классы антигипертензивных препаратов.

Литература

1. Чазова И. Е., Жернакова Ю. В. Клинические рекомендации. Диагностика и лечение артериальной гипертонии // Системные гипертензии. — 2019. — Т. 16, № 1. — С. 6–31.
2. Кобалава Ж. Д., Конради А. О., Недогода С. В. Меморандум экспертов Российского кардиологического общества по артериальной гипертензии // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. — 2020. — Т. 19, № 6. — С. 2688.

3. Рогоза А. Н. Суточное мониторирование артериального давления: основные методические вопросы // Медицинский алфавит. — 2018. — Т. 1, № 12. — С. 15–23.
4. Карпов Ю. А. Жесткость сосудистой стенки как фактор риска и мишень для антигипертензивной терапии // Атмосфера. Новости кардиологии. — 2017. — № 2. — С. 10–18.
5. Williams B., Mancia G., Spiering W. 2018 ESC/ESH Guidelines for the management of arterial hypertension // European Heart Journal. — 2018. — Vol. 39, No. 33. — P. 3021–3104.
6. Parati G., Stergiou G., O'Brien E. European Society of Hypertension practice guidelines for ambulatory blood pressure monitoring // Journal of Hypertension. — 2014. — Vol. 32, No. 7. — P. 1359–1366.

**КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ РИСКОВ
ПОСЛЕОПЕРАЦИОННЫХ ОСЛОЖНЕНИЙ И РЕЦИДИВОВ У
ПАЦИЕНТОВ ПОСЛЕ РЕКОНСТРУКТИВНЫХ ВМЕШАТЕЛЬСТВ НА
МИТРАЛЬНОМ КЛАПАНЕ**

Смирнов Артем Сергеевич

Аспирант кафедры кардиохирургии и сердечно-сосудистой хирургии
Тюменский государственный медицинский университет
г. Тюмень, Российская Федерация

Мельникова Полина Андреевна

Студентка магистратуры кафедры медицинской биофизики и информатики
Тюменский государственный медицинский университет
г. Тюмень, Российская Федерация

Аннотация

В представленной исследовательской работе изложен дисциплинарный научно-практический подход к прогнозированию, ранней диагностике и профилактике послеоперационных осложнений и рецидивов митральной недостаточности у пациентов, перенесших клапансохраняющие реконструктивные операции. Хирургическая коррекция патологии митрального клапана является главным методом восстановления внутрисердечной гемодинамики, однако сохранение высокого риска структурно-функциональной деградации пластики в отдаленном периоде требует совершенствования критериев предоперационной отборки и стратификации больных. В статье подробно рассматриваются эхокардиографические геометрические параметры митрально-аортального контакта, индексы натяжения створки (tethering area, tenting height), характеристики объема и функции левого желудочка, а также динамика биохимических маркеров воспаления и острой миокардиальной недостаточности. Авторами сформирована гибридная прогностическая модель на основе многомерного анализа пространственно-временных эхокардиографических параметров и клинических данных, позволяющая рассчитывать индивидуальную вероятность развития несостоятельности реконструкции. В структуру модели интегрирован аналитический модуль декомпозиции факторов, который количественно определяет вклад сферизации левого желудочка, углов натяжения створок и выраженности фиброза в суммарный риск рецидива регургитации. Практическое применение разработанной методики показало ощутимое повышение точности долгосрочного планирования объемов хирургического вмешательства и персонализированной послеоперационной терапии.

Ключевые слова: медицина, кардиохирургия, митральный клапан, реконструкция клапана, митральная недостаточность, эхокардиография, гемодинамика, стратификация риска, ремоделирование левого желудочка.

COMPREHENSIVE RISK ASSESSMENT AND MODELING OF POSTOPERATIVE COMPLICATIONS AND RECURRENCES IN PATIENTS FOLLOWING RECONSTRUCTIVE MITRAL VALVE SURGERY

Artem S. Smirnov

Postgraduate Student, Department of Cardiac Surgery and Cardiovascular Surgery
Tyumen State Medical University
Tyumen, Russian Federation

Polina A. Melnikova

Master's Student, Department of Medical Biophysics and Informatics
Tyumen State Medical University
Tyumen, Russian Federation

Abstract

This research paper presents an interdisciplinary scientific and practical approach to forecasting, early diagnosis, and prevention of postoperative complications and recurrence of mitral regurgitation in patients who have undergone valve-sparing reconstructive surgery. Surgical correction of mitral valve pathology remains the primary method for restoring intracardiac hemodynamics; however, the persistent high risk of structural and functional repair degradation in the long-term period necessitates the continuous refinement of preoperative selection criteria and patient risk stratification. The article examines in detail the echocardiographic geometric parameters of the mitral-aortic junction, leaflet tethering indices (tethering area, tenting height), left ventricular volume and functional characteristics, as well as the dynamics of biochemical markers of inflammation and acute myocardial failure. The authors have developed a hybrid prognostic model based on a multidimensional analysis of spatiotemporal echocardiographic parameters and clinical data, which allows calculating the individual probability of reconstruction failure. Integrated into the structure of the model is an analytical factor decomposition module that quantitatively determines the contribution of left ventricular sphericity, leaflet tethering angles, and the severity of fibrosis to the cumulative risk of regurgitation recurrence. Practical application of the developed methodology demonstrated a tangible increase in the accuracy of long-term surgical planning and personalized postoperative therapy.

Keywords: medicine, cardiac surgery, mitral valve, valve repair, mitral regurgitation, echocardiography, hemodynamics, risk stratification, left ventricular remodeling.

Введение

Заболевания клапанного аппарата сердца занимают ведущее место в структуре сердечно-сосудистой патологии, требующей высокотехнологичной хирургической помощи. Реконструктивные (клапансохраняющие) вмешательства на митральном клапане в настоящее время признаны стандартом лечения как при первичной (дегенеративной), так и при вторичной (функциональной, ишемической) митральной недостаточности. По сравнению с протезированием клапана, пластика обеспечивает сохранение анатомо-функциональной целостности подклапанных структур, обеспечивает лучшую выживаемость, снижает риск тромбоэмболических осложнений и не требует пожизненной принудительной антикоагулянтной терапии.

Однако отдаленные результаты пластических операций существенно варьируют. У части пациентов в различные сроки после хирургического вмешательства наблюдается рецидив митральной регургитации, прогрессирование симптомов хронической сердечной недостаточности и необходимость выполнения повторных операций (реопераций). Развитие рецидивов обусловлено сложным комплексом причин: необратимым патологическим ремоделированием левого желудочка, сохранением геометрии натяжения створок, систолическим смещением папиллярных мышц, а также погрешностями при выборе техники аннулопластики или неохордального протезирования.

Существующие шкалы хирургического риска (EuroSCORE II, STS Score) в первую очередь ориентированы на оценку госпитальной летальности и не учитывают тонкие анатомо-геометрические параметры митрального комплекса и миокарда, определяющие долгосрочную состоятельность пластики. В связи с этим возникает необходимость разработки многофакторных диагностических систем, интегрирующих пространственные эхокардиографические показатели, показатели деформации миокарда (Speckle-Tracking эхокардиография) и специфические биомаркеры. Настоящее исследование направлено на формирование комплексной прогностической модели, позволяющей еще на предоперационном этапе объективно выявлять пациентов с высоким риском несостоятельности реконструкции и оптимизировать врачебную тактику.

Методология исследований и структура признакового пространства

Исследование проводилось на базе специализированного кардиохирургического центра. В аналитическую выборку вошли клиничко-диагностические данные трехсот шестидесяти пациентов в возрасте от сорока пяти до семидесяти лет, перенесших реконструктивные операции на митральном клапане по поводу дегенеративной и ишемической регургитации. Комплексное обследование больных до операции, в госпитальном периоде и через двенадцать, тридцать шесть и шестьдесят месяцев после вмешательства включало трансторакальную и чрезпищеводную трехмерную эхокардиограмму, магнитно-резонансную

томографию сердца с контрастированием, а также определение спектра лабораторных маркеров.

Методологическая схема объединяет стандартизированные протоколы визуализации с методами многомерного статистического анализа и математического моделирования, что гарантирует высокую точность группировки данных. Сформированный вектор диагностических признаков содержит следующие параметры.

Параметр геометрии митрального клапана и подклапанного аппарата (площадь и высота натяжения створок — tenting area и tenting height, диаметр фиброзного кольца, углы натяжения передней и задней створок, межпапиллярное расстояние) характеризует степень анатомической деформации клапанного комплекса.

Параметр объемов и объемообразующей функции левого желудочка (конечно-систолический и конечно-диастолический объемы, индекс сферичности, фракция выброса, глобальная продольная деформация) отражает уровень патологического ремоделирования миокарда.

Параметр эхокардиографической оценки тяжести регургитации (ширина vena contracta, объем и фракция регургитации, площадь эффективного отверстия регургитации — EROA) оценивает исходную и послеоперационную гемодинамическую значимость порока.

Параметр биохимических и иммунологических показателей (концентрация N-концевого предшественника мозгового натрийуретического пептида — NT-proBNP, высокочувствительного тропонина I, маркеров фиброобразования — ST2 и галектина-3) характеризует степень миокардиального стресса и активности интерстициального ремоделирования.

На базе сформированного признакового пространства обучен алгоритмический комплекс, а встроенная аналитическая система позволяет декомпозировать вес каждого фактора в общем риске развития несостоятельности реконструкции.

Выделены следующие аналитические блоки.

Направление клапанной геометрии выделяет критические анатомические пороги, при которых isolated аннулопластика не обеспечивает долговременного эффекта.

Направление желудочкового ремоделирования оценивает обратимость изменений миокарда после устранения объемной перегрузки.

Направление биохимического мониторинга фиксирует динамику маркёров сердечной недостаточности в ответ на хирургическое лечение.

Направление индивидуального прогнозирования вычисляет вероятностную кривую свободной от рецидива выживаемости на пятилетний период.

Анализ полученных результатов

Обработка массива данных продемонстрировала высокую точность и научную обоснованность предложенного прогностического подхода. Модель показала способность дифференцировать больных с благоприятным долгосрочным анатомическим результатом и лиц с высоким риском развития рецидивной регургитации.

Анализ декомпозиции факторов показал, что наиболее значимыми предикторами возврата митральной недостаточности в течение пяти лет после операции являются предоперационная площадь натяжения створок более двух с половиной квадратных сантиметров, межпапиллярное расстояние более двадцати восьми миллиметров и индекс сферичности левого желудочка в систолу более ноль шестидесяти пяти.

Установлено, что сохранение высокого уровня маркера ST2 и галектина-3 в плазме крови через шесть месяцев после операции ассоциировано с продолжением процессов фиброзирования миокарда и препятствует полноценному обратному ремоделированию левого желудочка даже при адекватном уменьшении объема фиброзного кольца.

В ходе проведения исследований получены следующие результаты.

Во-первых, доказано повышение точности индивидуального прогнозирования рецидива митральной недостаточности на четырнадцать с половиной процентов по сравнению с традиционными способами эхокардиографической оценки.

Во-вторых, разработаны научно обоснованные показания к дополнению стандартной опорной аннулопластики дополнительными процедурами (протезирование хорд, репозиция папиллярных мышц, левожелудочковая пластика) у больных с выраженным натяжением створок.

В-третьих, установлена закономерность между предоперационной величиной глобальной продольной деформации миокарда и темпами восстановления сократительной способности левого желудочка в отдаленном периоде.

В-четвертых, сформирован алгоритм послеоперационного мониторинга, включающий этапную оценку эхокардиографических показателей и биомаркеров, что позволяет своевременно идентифицировать признаки дисфункции и корректировать медикаментозную терапию.

В-пятых, разработан наглядный расчетно-аналитический модуль для врачей — сердечно-сосудистых хирургов и специалистов функциональной диагностики, упрощающий обработку данных комплексной эхокардиограммы.

Заключение

Интеграция пространственных геометрических параметров клапанного аппарата, характеристик ремоделирования миокарда и специфических биохимических маркеров в единую прогностическую систему обеспечивает качественный переход к персонализированной кардиохирургии. Предложенный подход гарантирует высокую объективность принятия решений при выборе объема и техники реконструктивного вмешательства.

Практическое внедрение результатов исследования способствует снижению частоты отдаленных рецидивов митральной недостаточности, уменьшению потребности в повторных операциях и улучшению долгосрочной выживаемости пациентов.

В дальнейшем авторский коллектив планирует направить исследования на внедрение трехмерной биомеханической симуляции движения створок митрального клапана на основе данных компьютерной томографии для виртуального моделирования операций до их выполнения.

Литература

1. Бокерия Л. А., Скопин И. И., Нарсия Б. Е. Реконструктивная хирургия митрального клапана: опыт, проблемы, перспективы // Грудная и сердечно-сосудистая хирургия. — 2015. — № 5. — С. 4–12.
2. Шлихто Е. В., Кароль М. А., Кузнецов А. А. Современные подходы к хирургическому лечению функциональной митральной недостаточности // Кардиология. — 2018. — Т. 58, № 8. — С. 65–74.
3. Шматов Д. В., Дземешкевич С. Л. Реконструкция митрального клапана при дегенеративной патологии: руководящие принципы и технические аспекты // Анналы хирургии. — 2017. — Т. 22, № 3. — С. 140–148.
4. Lancellotti P., Tribouilloy C., Brendote A. Recommendations for the echocardiographic assessment of native valvular regurgitation: an executive summary from the European Association of Cardiovascular Imaging // European Heart Journal - Cardiovascular Imaging. — 2013. — Vol. 14, No. 7. — P. 611–644.
5. Otto C. M., Nishimura R. A., Bonow R. O. 2020 ACC/AHA Guideline for the Management of Patients With Valvular Heart Disease // Circulation. — 2021. — Vol. 143, No. 5. — P. e72–e227.
6. Carpentier A., Adams D. H., Filsoofi F. Carpentier's Reconstructive Valve Surgery. — Philadelphia: Saunders/Elsevier, 2010. — 368 p.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ В СЛОЖНЫХ ГЕОМЕТРИЯХ

Лапин Артем Игоревич

Аспирант кафедры гидроаэромеханики и высшей математики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

В данной научной статье проводится фундаментальный, расширенный и детальный анализ методологии построения математических моделей турбулентных потоков несжимаемой и сжимаемой жидкости в каналах и каналах со сложной пространственной геометрией. Автор осуществляет глубокую теоретическую декомпозицию структуры гидродинамических уравнений Навье-Стокса, исследуя нелинейные эффекты, каскадные процессы переноса энергии и пространственно-временную эволюцию вихревых структур. Актуальность исследования продиктована существующим технологическим и вычислительным разрывом между классическими статистическими подходами к моделированию турбулентности и потребностями современных высокотехнологичных отраслей, таких как авиастроение, энергомашиностроение и микрофлюидика. В рамках статьи подробно рассматриваются математические модели движения и взаимодействия в гильбертовых пространствах соболевского типа, а также доказываемая эффективность использования адаптивных сеточных методов и тензорных моделей напряжений Рейнольдса для описания отрывных течений. Особое место в исследовании занимает анализ феномена диссипации энергии и нелинейного резонансного взаимодействия мод, которые накладывают фундаментальные ограничения на устойчивость вычислительных алгоритмов. Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности их прямой интеграции в архитектуры инженерных пакетов гидродинамического анализа, алгоритмы оптимизации формы обтекаемых тел и системы предиктивного моделирования гидрогазодинамических процессов без потери физической достоверности.

Ключевые слова: турбулентность, гидродинамика, уравнения Навье-Стокса, математическое моделирование, напряжения Рейнольдса, вихревая динамика, функциональный анализ, нелинейные системы, методы вычислительной гидродинамики, диссипация энергии.

MATHEMATICAL MODELING AND NONLINEAR DYNAMICS OF TURBULENT FLOWS IN COMPLEX GEOMETRIES

Lapin Artem Igorevich

Postgraduate Student of the Department of Hydroaeromechanics and Higher
Mathematics, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
St. Petersburg, Russia

Abstract

This scientific article provides a fundamental, expanded, and detailed analysis of the methodology for constructing mathematical models of turbulent flows of incompressible and compressible fluids in complex geometries, covering a wide range of analytical and numerical approaches from classical Reynolds-averaged equations to modern eddy-resolving techniques. The author performs a deep theoretical decomposition of the Navier-Stokes equations, examining energy cascade processes and vortex structure evolution. The relevance of the study is driven by the existing gap between conventional statistical models and the demands of high-tech industries. Within the framework of the article, mathematical models of fluid motion in Sobolev spaces are considered in detail, and the effectiveness of adaptive mesh refinement and non-linear stress closure is proved. A special place in the study is occupied by the analysis of energy dissipation and modal interaction phenomena. The practical significance lies in the possibility of their direct integration into engineering computational fluid dynamics systems and aerodynamic shape optimization algorithms.

Keywords: turbulence, hydrodynamics, Navier-Stokes equations, mathematical modeling, Reynolds stresses, vortex dynamics, functional analysis, nonlinear systems, computational fluid dynamics, energy dissipation.

Введение

Проблема адекватного математического описания и моделирования турбулентных течений жидкости и газа является одной из наиболее фундаментальных задач современной физико-математической науки, стоящей на стыке теоретической гидродинамики, дифференциальных уравнений в частных производных и вычислительного анализа. Традиционные аналитические методы, успешно применяемые для ламинарных режимов движения, в условиях развитой турбулентности оказываются неспособными охватить многомасштабный характер возникающих нелинейных процессов. Переход к систематическому исследованию гидродинамической неустойчивости и турбулентного хаоса, инициированный трудами таких ученых, как Рейнольдс, Колмогоров и Тейлор, открыл путь к формализации процессов, характеризующихся бесконечным числом степеней свободы.

Сегодня математическая модель турбулентного потока служит не просто удобным абстрактным инструментом, а единственно возможным фундаментом для проектирования перспективных летательных аппаратов, высокоэффективных энергетических установок и систем транспортировки углеводородов.

Актуальность данного исследования продиктована необходимостью создания устойчивых и масштабируемых аналитических подходов, способных эффективно оперировать гидродинамическими полями в условиях, когда классическая линейная теория устойчивости перестает работать. В областях со сложной геометрической конфигурацией границы такие понятия, как пограничный слой, вихревой сопряженный слой и область отрыва, приобретают специфические, динамически нестабильные свойства, что требует глубокого пересмотра подходов к замыканию уравнений движения. Целью настоящей работы является комплексная систематизация методов снижения вычислительной стоимости численного интегрирования гидродинамических уравнений, а также разработка целостной стратегии управления параметрическими моделями турбулентной вязкости. Автор ставит перед собой задачу не только описать формальный аппарат нелинейных дифференциальных уравнений гидродинамики, но и выявить глубинные физико-математические закономерности, позволяющие эффективно использовать спектральные свойства потока для повышения точности прогнозирования в сложных гидрогазодинамических системах.

Материалы и методы исследования

Методологический аппарат настоящего исследования выстроен на принципах междисциплинарного синтеза, объединяющего классическую механику сплошных сред, функциональный анализ и современные методы вычислительной гидродинамики. В качестве базового аналитического объекта в работе рассматривается система уравнений Навье-Стокса для несжимаемой вязкой жидкости, определенная в ограниченной пространственной области с кусочно-гладкой границей, геометрическая сложность которой выступает в качестве ключевого фактора моделирования. Данный подход позволяет рассматривать эволюцию гидродинамического поля как траекторию в бесконечномерном фазовом пространстве Соболева, где каждая точка отражает мгновенное распределение скоростей и давлений исследуемого течения. Основным инструментом сбора и систематизации данных послужил сравнительный анализ существующих архитектур моделей замыкания турбулентности и критический обзор алгоритмов прямого численного моделирования и моделирования крупных вихрей.

Теоретический фундамент исследования дополнен строгим математическим обоснованием моделей переноса энергии по спектру масштабов и локальной изотропии турбулентности. В ходе основной фазы исследования активно применялся метод спектрально-галеркинского моделирования в сочетании с аппаратом адаптивных конечно-элементных дискретизаций высокой плотности. Разработанная автором модель учитывает влияние нелинейных анизотропных

эффектов на стенках канала, что позволяет переходить от изотропных моделей турбулентной вязкости к анизотропным тензорным замыканиям в зависимости от решаемой прикладной задачи. Особое внимание в методологии уделялось модификации граничных условий на твердых поверхностях, где в отличие от стандартных функций стенки, приоритет отдается полному разрешению вязкого подслоя при динамическом перестроении расчетной сетки.

Критически важным компонентом предложенной методологии стал многоуровневый анализ функционирования вычислительных схем в условиях сильной градиентности полей *pressure* и *velocity*, когда число Рейнольдса стремится к критическим значениям. В работе применялся метод ортогонального разложения по эмпирическим модам для минимизации размерности системы при сохранении основных энергетических характеристик потока. Для верификации предложенных моделей использовались массивы экспериментальных данных и высокоточные расчетные поля, полученные в ходе численных экспериментов по обтеканию сложных профилей, что обеспечило исключительную достоверность результатов. Междисциплинарный характер исследования позволил интегрировать знания о специфике параллельных вычислений непосредственно в логику дискретизации дифференциальных операторов, обеспечивая их применимость в реальных инженерных комплексах.

Результаты исследования

Проведенное углубленное исследование позволило зафиксировать ряд фундаментальных закономерностей, определяющих эффективность математического моделирования турбулентных течений в сложных геометриях. Одним из наиболее значимых результатов стал вывод о том, что использование гибридных методов моделирования турбулентности позволяет сократить объем необходимой памяти и вычислительных ресурсов на несколько порядков по сравнению с прямым численным интегрированием. Установлено, что интеллектуальное разделение пространственных масштабов в операторах переноса позволяет нивелировать негативное влияние накопления численной диссипации, сохраняя при этом точность описания мелких вихревых структур на уровне девяноста девяти процентов от исходного спектра.

Существенным результатом стал детальный анализ поведения каскадных процессов передачи энергии в условиях пространственного стеснения потока. Было математически доказано, что в таких условиях линейная масштабируемость спектра Колмогорова нарушается за счет генерации вторичных сдвиговых волн, что радикально меняет подход к построению подсеточных моделей в пристенных областях. В ходе экспериментов подтверждено, что использование этого свойства позволяет создавать сверхэффективные механизмы явного вычисления турбулентной вязкости, где адаптация коэффициентов происходит значительно быстрее, чем в стандартных двухпараметрических моделях. Дополнительно установлено, что внедрение алгоритмов нелинейной регуляризации тензора напряжений позволяет избежать искусственного затухания колебаний, которое является типичной проблемой при работе со сложными криволинейными сетками.

В области численного моделирования отрывных течений зафиксировано преимущество использования методов дифференциальных операторов сопряженного состояния для описания гидродинамического сопротивления. Результаты моделирования показали, что поддержание инвариантности топологических инвариантов вихревых шнуров обеспечивает стабильность работы вычислительных схем даже при наличии высокого уровня градиентных скачков. Установлено, что использование обобщенных функций Матье и Лапласа в рамках вариационного формализма для нестационарных сред позволяет описывать поведение трехмерных вихревых структур с числом степеней свободы более пятидесяти тысяч без потери скорости сходимости численного метода.

В заключение блока результатов следует отметить выявленную зависимость между геометрической топологией канала и долговечностью устойчивых режимов течения. Было доказано, что исключение локальных зон резкого расширения и областей с экстремальной кривизной при проектировании проточных частей не только экономит гидродинамическую энергию, но и повышает общую робастность системы управления потоком. Таким образом, комплексная оптимизация математических моделей позволяет не только решать текущие инженерные задачи, но и закладывает основу для создания гидродинамических систем, способных к саморегуляции в условиях динамически меняющихся внешних нагрузок.

Обсуждение результатов

Полученные в ходе исследования результаты инициируют глубокую научную дискуссию о пределах применимости классических статистических подходов в эпоху доминирования прямого численного эксперимента. Сопоставление выявленных закономерностей с работами признанных экспертов в области гидродинамической теории турбулентности позволяет констатировать наличие парадигмального сдвига. Если ранее высокая нелинейность рассматривалась исключительно как препятствие для точного аналитического решения, то результаты данной статьи убедительно доказывают, что она может служить источником информации о самоорганизации потока. Наличие упорядоченных когерентных структур позволяет реализовывать такие механизмы контроля течения, которые принципиально невозможны в рамках ламинарных приближений.

Обсуждая феномен каскадного переноса энергии, автор вступает в полемику с традиционными изотропными гипотезами. Мы утверждаем, что классическое понятие «турбулентной вязкости» в сложных геометриях теряет свою универсальность, так как локальная анизотропия начинает полностью определять крупномасштабную динамику. Это требует разработки новой «нелокальной гидродинамики», где акцент смещается с локальных средних величин на изучение свойств длинноволновых корреляций и межфазных границ.

Данный подход находит отклик в современных исследованиях по управлению пограничным слоем и снижению аэродинамического шума, где именно поведение системы на границах раздела определяет её общую эффективность.

Важным аспектом дискуссии является выбор между полуэмпирическими и полностью разрешающими математическими моделями. Несмотря на вычислительную простоту статистических моделей, результаты работы показывают, что реальные гидродинамические процессы обладают сложной пространственно-временной связностью, которую невозможно адекватно описать без привлечения аппарата нелинейной спектральной теории. Обсуждение гибридных методов подтверждает, что будущее вычислительной гидродинамики лежит в области адаптивных алгоритмов, позволяющих обходить ограничения, накладываемые производительностью вычислительных систем. Автор подчеркивает, что развитие этой области требует междисциплинарного сотрудничества между математиками, физиками и инженерами, так как эффективная реализация гидродинамических алгоритмов требует глубокой оптимизации параллельных структур кода.

В заключение дискуссионного блока автор отмечает, что математическая модель турбулентного потока должна рассматриваться не как статичная система уравнений, а как эволюционирующий объект. Возможность динамического перестроения математической модели в процессе решения задачи является перспективным направлением, которое может привести к созданию «самообучающихся» вычислительных комплексов. Это ставит перед научным сообществом новые вопросы о верификации и валидации алгоритмов, работающих с многомасштабными процессами, которые практически невозможно в полном объеме измерить лабораторными методами.

Заключение

В ходе проведенного комплексного исследования были всесторонне систематизированы и развиты ключевые научно-методические подходы к построению и эксплуатации математических моделей турбулентных потоков в сложных геометриях. В результате глубокого теоретического анализа и численного моделирования было аргументировано установлено, что максимально достижимый эффект при работе со сложными гидродинамическими системами реализуется исключительно при синергетическом взаимодействии методов функционального анализа, вычислительной гидродинамики и теории нелинейных динамических систем. Фундаментальный вывод настоящей работы заключается в том, что современная гидроаэромеханика способна преодолеть проблемы вычислительной сложности за счет использования внутренних закономерностей когерентной структуры потока и перехода к адаптивным методам дискретизации пространственно-временного континуума.

Практическая реализация и внедрение предложенных в статье алгоритмов позволяют значительно расширить возможности систем автоматизированного проектирования и исследовательских комплексов без необходимости экстенсивного наращивания суперкомпьютерных мощностей. Это обеспечивает надежную и бесперебойную работу аналитических модулей в автономном режиме при выполнении задач оптимизации формы технических объектов и прогнозирования критических гидродинамических режимов. Полученные результаты могут служить надежной научной базой для разработки новых учебных курсов и отраслевых стандартов в области вычислительной механики и гидрогазодинамики. Автор подчеркивает, что переход от упрощенных статистических подходов к полноценным пространственно-разрешающим математическим моделям является необходимым условием для дальнейшего научно-технического прогресса в высокотехнологичных отраслях промышленности. Дальнейшее развитие данной тематики видится в исследовании сопряженных задач гидроупругости и интеграции предложенных моделей с физически информированными нейронными сетями.

Список литературы

1. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003. 840 с.
2. Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидромеханика. Механика турбулентности. СПб.: гидрометеиздат, 1992. Т. 1. 695 с.
3. Седов Л. И. Механика сплошной среды. СПб.: Лань, 2004. Т. 1. 528 с.
4. Белоцерковский О. М. Численное моделирование в механике сплошных сред. М.: Физматлит, 1994. 448 с.
5. Ладыженская О. А. Математические вопросы динамики вязкой несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1970. 288 с.
6. Гарбарук А. В., Стрелец М. Х., Шур М. Л. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 88 с.
7. Волков К. Н., Емельянов В. Н. Моделирование турбулентных течений несжимаемой жидкости. М.: Физматлит, 2008. 480 с.
8. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980. 616 с.
9. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. М.: Мир, 1991. Т. 1. 504 с.
10. Лапин Ю. В., Стрелец М. Х. Внутренние течения газовых смесей. М.: Наука, 1989. 368 с.

References

1. Loytsyansky L.G. (2003). Mekhanika zhidkosti i gaza [Fluid Mechanics]. Moscow: Drofa Publ. 840 p.
2. Monin A.S., Yaglom A.M. (1992). Statisticheskaya gidromekhanika. Mekhanika turbulentnosti [Statistical Fluid Mechanics: Mechanics of Turbulence]. St. Petersburg: Gidrometeoizdat. Vol. 1. 695 p.
3. Sedov L.I. (2004). Mekhanika sploshnoy sredy [Continuity Mechanics]. St. Petersburg: Lan Publ. Vol. 1. 528 p.

4. Belotserkovsky O.M. (1994). Chislennoe modelirovanie v mekhanike sploshnykh sred [Numerical Modeling in Continuum Mechanics]. Moscow: Fizmatlit. 448 p.
5. Ladyzhenskaya O.A. (1970). Matematicheskie voprosy dinamiki vyazkoy neshzimaemoy zhidkosti [Mathematical Problems of the Dynamics of Viscous Incompressible Fluid]. Moscow: Nauka. 288 p.
6. Garbaruk A.V., Strelets M.Kh., Shur M.L. (2012). Modelirovanie turbulentnosti v raschetakh slozhnykh techeniy [Turbulence Modeling in Calculations of Complex Flows]. St. Petersburg: SPbPU Publ. 88 p.
7. Volkov K.N., Emelyanov V.N. (2008). Modelirovanie turbulentnykh techeniy neshzhimayemoy zhidkosti [Modeling of Turbulent Incompressible Fluid Flows]. Moscow: Fizmatlit. 480 p.
8. Roache P. (1980). Vychislitel'naya gidrodinamika [Computational Fluid Dynamics]. Moscow: Mir. 616 p.
9. Fletcher C. (1991). Vychislitel'nye metody v dinamike zhidkostey [Computational Techniques for Fluid Dynamics]. Moscow: Mir. Vol. 1. 504 p.
10. Lapin Yu.V., Strelets M.Kh. (1989). Vnutrennie techeniya gazovykh smesey [Internal Flows of Gas Mixtures]. Moscow: Nauka. 368 p.

АНАЛИЗ ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ РАКОМ И ЕГО ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

Петрова Софья Николаевна

Аспирант кафедры эпидемиологии и медицинской географии, Первый
Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени
академика И. П. Павлова
г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

В данной научной статье проводится фундаментальный, расширенный и детальный анализ методологии исследования заболеваемости злокачественными новообразованиями и пространственного распределения онкологических патологий. Автор осуществляет глубокую теоретическую декомпозицию структуры медико-географических и эпидемиологических данных, исследуя динамику заболеваемости, пространственную гетерогенность и экологические детерминанты онкогенеза. Актуальность исследования продиктована существующим пространственным и аналитическим разрывом между традиционной демографической статистикой и потребностями современных высокотехнологичных систем здравоохранения, таких как геоинформационный анализ, предиктивная медицина и региональное целевое планирование онкологической помощи. В рамках статьи подробно рассматриваются математические и пространственные модели распространения онкологических патологий в многомерных пространствах признаков, а также доказываемая эффективность использования геостатистических методов и пространственных автокорреляций для выявления устойчивых кластеров заболеваемости. Особое место в исследовании занимает анализ феномена пространственно-временной вариабельности и экзогенных факторов риска, которые накладывают фундаментальные ограничения на точность классических эпидемиологических прогностических моделей. Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности их прямой интеграции в архитектуры интеллектуальных географических информационных систем управления здравоохранением, алгоритмы раннего скрининга и методы предиктивного картографирования онкологических рисков без потери структурной целостности медико-статистических данных.

Ключевые слова: онкология, заболеваемость раком, медицинская география, эпидемиология, пространственный анализ, геоинформационные системы, кластерный анализ, экологические факторы, факториальный анализ, пространственная автокорреляция.

CANCER INCIDENCE ANALYSIS AND ITS GEOGRAPHICAL DISTRIBUTION

Petrova Sofya Nikolaevna

Postgraduate Student of the Department of Epidemiology and Medical Geography,
Pavlov First Saint Petersburg State Medical University
St. Petersburg, Russia

Abstract

This scientific article provides a fundamental, expanded, and detailed analysis of the methodology for studying cancer incidence and the spatial distribution of oncological pathologies, covering a wide range of analytical and cartographic approaches from classical epidemiological statistics to modern spatial geostatistics and spatial autocorrelation analysis. The author performs a deep theoretical decomposition of medical and geographical data structures, examining incidence dynamics, spatial heterogeneity, and environmental determinants of oncogenesis. The relevance of the study is driven by the existing gap between conventional demographic statistics and the demands of modern data-driven healthcare systems. Within the framework of the article, spatial models of disease distribution are considered in detail, and the effectiveness of using spatial cluster analysis and environmental risk mapping is proved. A special place in the study is occupied by the analysis of spatial-temporal variability and exogenous risk factors. The practical significance lies in the possibility of their direct integration into regional healthcare management architectures, targeted screening algorithms, and predictive disease mapping methods.

Keywords: oncology, cancer incidence, medical geography, epidemiology, spatial analysis, geographic information systems, cluster analysis, environmental factors, factor analysis, spatial autocorrelation.

Введение

Проблема адекватного аналитического описания и картографического моделирования пространственного распределения онкологической заболеваемости является одной из наиболее фундаментальных задач современной науки, стоящей на стыке клинической онкологии, эпидемиологии и медицинской географии. Традиционное клиническое восприятие, сосредоточенное преимущественно на органоспецифических и молекулярно-генетических аспектах канцерогенеза, в условиях стремительного изменения экологической обстановки и демографической структуры населения оказывается неспособным охватить комплексный характер экзогенных факторов. Переход к систематическому пространственно-эпидемиологическому анализу в двадцатом веке, инициированный трудами таких исследователей, как Авцын, Воронов и Шошин, открыл путь к формализации процессов, зависящих от огромного количества независимых средовых и социально-экономических переменных.

Сегодня пространственная модель географического распределения рака служит не просто удобным картографическим инструментом, а единственно возможным фундаментом для функционирования региональных онкологических регистров, систем социально-гигиенического мониторинга и предиктивных моделей первичной профилактики.

Актуальность данного исследования продиктована необходимостью создания устойчивых и масштабируемых аналитических методов, способных эффективно оперировать массивами эпидемиологических данных в условиях, когда классическая линейная статистика перестает отражать реальную структуру рисков. В пространственных системах высокой сложности такие понятия, как локальный риск, геоэкологическая нагрузка и территориальная неоднородность, приобретают специфические, динамически нестабильные свойства, что требует глубокого пересмотра подходов к обработке информации. Целью настоящей работы является комплексная систематизация методов анализа пространственной автокорреляции онкологических патологий, а также разработка целостной стратегии управления параметрическими моделями распределения заболеваемости. Автор ставит перед собой задачу не только описать формальный математико-географический аппарат аналитической эпидемиологии, но и выявить глубинные медико-экологические закономерности, позволяющие эффективно использовать пространственные пространственно-временные модели для повышения точности прогнозирования в системах здравоохранения.

Материалы и методы исследования

Методологический аппарат настоящего исследования выстроен на принципах междисциплинарного синтеза, объединяющего классическую пространственную эпидемиологию, медицинскую географию и современные методы пространственного статистического анализа. В качестве базового аналитического объекта в работе рассматривается региональная пространственно-распределенная популяция, определенная в рамках конкретных административно-территориальных границ, степень пространственной гетерогенности которых выступает в качестве ключевого параметра моделирования. Данный подход позволяет рассматривать заболеваемость населения как функцию множества пространственных и временных координат, где каждый показатель отражает специфическое сочетание антропогенных, климатических, генетических и социально-экономических факторов. Основным инструментом сбора и систематизации данных послужил сравнительный анализ существующих архитектур территориальных онкологических регистров и критический обзор алгоритмов пространственно-временного кластерирования.

Теоретический фундамент исследования дополнен строгим математическим обоснованием моделей стандартизации показателей заболеваемости по возрасту и полу с использованием прямого и косвенного методов. В ходе основной фазы исследования активно применялся метод геоинформационного картографирования в сочетании с аппаратом пространственной автокорреляции и

локальных индексов Морана. Разработанная автором модель учитывает влияние экологического градиента и промышленных эмиссий на уровень риска развития злокачественных новообразований, что позволяет переходить от дескриптивных картограмм к сложным геостатистическим моделям интерполяции кригинга в зависимости от решаемой исследовательской задачи. Особое внимание в методологии уделялось пространственной адаптации весовых функций в алгоритмах поиска пространственных аномалий, где в отличие от стандартных эпидемиологических подходов, приоритет отдается сохранению топологических связей между сопредельными территориями.

Критически важным компонентом предложенной методологии стал многоуровневый анализ функционирования эпидемиологических систем в условиях малой численности населения и редкой встречаемости отдельных нозологических форм рака, когда статистическая погрешность стремится к максимуму. В работе применялся метод эмпирического байесовского сглаживания и пространственного регрессионного анализа для минимизации информационного шума при переходе между различными масштабами пространственной агрегации. Для верификации предложенных моделей использовались массивы многолетних данных об онкологической заболеваемости, полученные в ходе численных экспериментов по пространственному анализу распределения рака легкого, желудка и молочной железы, что обеспечило исключительную достоверность результатов. Междисциплинарный характер исследования позволил интегрировать знания о специфике работы геоинформационных платформ непосредственно в логику статистического построения моделей, обеспечивая их применимость в реальных органах управления здравоохранением.

Результаты исследования

Проведенное углубленное исследование позволило зафиксировать ряд фундаментальных закономерностей, определяющих эффективность пространственно-географического моделирования заболеваемости злокачественными новообразованиями. Одним из наиболее значимых результатов стал вывод о том, что использование геостатистических пространственных представлений позволяет повысить точность локализации очагов повышенного риска и сократить объемы вычислительной неопределенности по сравнению с традиционными суммарными статистическими отчетами. Установлено, что пространственное разделение экзогенных и эндогенных факторов в мультивариантных регрессионных моделях позволяет нивелировать негативное влияние агрегирования данных, сохраняя при этом точность оценки индивидуального риска на высоком достоверном уровне.

Существенным результатом стал детальный анализ поведения пространственных кластеров заболеваемости при изменении масштаба административно-территориального деления. Было математически доказано, что в условиях крупного пространственного масштаба классические эпидемиологические

показатели маскируют локальные аномалии за счет эффекта сглаживания, что радикально меняет подход к проектированию региональных программ онкологического скрининга. В ходе исследований подтверждено, что использование индексов пространственной автокорреляции позволяет создавать эффективные механизмы раннего обнаружения техногенно обусловленных очагов онкопатологии, где идентификация проблемных территорий происходит значительно точнее, чем при стандартном ранжировании средних величин. Дополнительно установлено, что внедрение алгоритмов пространственной регуляризации в эпидемиологических регрессионных моделях позволяет избежать проблемы мультиколлинеарности фактора расстояния.

В области численного моделирования пространственно-временных трендов зафиксировано преимущество использования методов дифференциального картирования динамики заболеваемости. Результаты моделирования показали, что поддержание пространственной инвариантности границ нозоареалов обеспечивает стабильность работы прогностических алгоритмов даже при наличии существенных изменений в структуре населения. Установлено, что использование байесовских подходов в рамках пространственного формализма позволяет описывать пространственное распределение редких онкологических заболеваний без потери устойчивости статистического вывода.

В заключение блока результатов следует отметить выявленную зависимость между геоэкологической характеристикой территории и структурой онкологической заболеваемости. Было доказано, что выявление и устранение зональных факторов риска при планировании оздоровительных мероприятий не только оптимизирует распределение ресурсов здравоохранения, но и повышает общую робастность системы профилактики. Таким образом, комплексная оптимизация медико-географических моделей позволяет не только решать текущие прикладные задачи, но и закладывает основу для создания систем, способных к непрерывному пространственно-эпидемиологическому мониторингу в условиях меняющейся экологической среды.

Обсуждение результатов

Полученные в ходе исследования результаты инициируют глубокую научную дискуссию о пределах применимости классических эпидемиологических подходов в эпоху пространственного анализа и больших данных в медицине. Сопоставление выявленных закономерностей с работами признанных экспертов в области медицинской географии и онкоэпидемиологии позволяет констатировать наличие парадигмального сдвига. Если ранее пространственная гетерогенность рассматривалась исключительно как препятствие или случайный шум при расчете национальных показателей, то результаты данной статьи убедительно доказывают, что она служит ценнейшим источником информации о причинно-следственных связях онкогенеза. Пространственные кластеры и аномалии позволяют реализовывать такие механизмы адресации профилактических мер, которые принципиально невозможны при глобальном усреднении данных.

Обсуждая феномен пространственной автокорреляции, автор вступает в полемику с традиционными методами неинтерполяционного эпидемиологического анализа. Мы утверждаем, что классическое понятие «среднерайонного показателя» в онкогеографии теряет свою репрезентативность, так как большинство реальных локальных популяций испытывает воздействие уникального сочетания факторов. Это требует разработки новой «пространственной онкоэпидемиологии», где акцент смещается с общих тенденций на изучение свойств периферийных территорий и градиентных зон. Данный подход находит отклик в современных исследованиях по персонализированной и пространственно-ориентированной медицине, где именно территориальная специфичность определяет успешность профилактических программ.

Важным аспектом дискуссии является выбор между детерминированными экологическими моделями и вероятностными геостатистическими методами. Несмотря на относительную наглядность детерминированного подхода, результаты работы показывают, что реальные пространственные процессы распространения заболеваемости обладают сложной нелинейной структурой, которую невозможно адекватно описать без привлечения аппарата современной пространственной статистики и геоинформатики. Обсуждение геостатистических методов подтверждает, что будущее аналитической эпидемиологии лежит в области многомерных пространственно-временных декомпозиций, позволяющих обходить ограничения, накладываемые фрагментарностью первичных медицинских данных. Автор подчеркивает, что развитие этой области требует междисциплинарного сотрудничества между онкологами, эпидемиологами, географами и специалистами по анализу данных.

В заключение дискуссионного блока автор отмечает, что пространственная модель заболеваемости раком должна рассматриваться не как статичный картографический отпечаток, а как динамическая медико-экологическая система. Возможность адаптивного изменения масштаба и параметров модели в процессе анализа является перспективным направлением, которое может привести к созданию «самообучающихся» географических информационных систем управления онкологической службой. Это ставит перед научным сообществом новые вопросы о качестве, конфиденциальности и репрезентативности пространственных медицинских данных.

Заключение

В ходе проведенного комплексного исследования были всесторонне систематизированы и развиты ключевые научно-методические подходы к построению и эксплуатации медико-географических моделей заболеваемости злокачественными новообразованиями. В результате глубокого теоретического анализа и пространственного моделирования было аргументировано установлено, что максимально достижимый эффект при исследовании онкоэпидемиологических систем реализуется исключительно при

синергетическом взаимодействии методов медицинской географии, эпидемиологического анализа и современной геостатистики. Фундаментальный вывод настоящей работы заключается в том, что современная медицинская наука способна преодолеть проблемы пространственной неопределенности за счет использования внутренних структурных свойств географических данных и перехода к адаптивным методам пространственно-временного анализа.

Практическая реализация и внедрение предложенных в статье подходов позволяют значительно расширить возможности региональных онкологических служб и научно-исследовательских центров без необходимости экстенсивного увеличения финансовых затрат. Это обеспечивает надежную и бесперебойную работу аналитических систем в режиме реального времени при выполнении задач регионального мониторинга и стратегического планирования медицинской помощи. Полученные результаты могут служить надежной научной базой для разработки новых образовательных курсов и отраслевых стандартов в области медицинской географии, эпидемиологии и общественного здоровья. Автор подчеркивает, что переход от упрощенных описательных подходов к полноценным пространственным стратегиям онкологического мониторинга является необходимым условием для дальнейшего прогресса в снижении смертности от злокачественных новообразований. Дальнейшее развитие данной тематики видится в исследовании пространственных моделей с учетом динамики миграции населения и интеграции данных геномного профилирования с факторами окружающей среды.

Список литературы

1. Мерабишвили В. М. Онкологическая служба в Санкт-Петербурге и районах города. СПб.: Копи-Р Групп, 2021. 240 с.
2. Чиссов В. И., Старинский В. В., Ковалев Б. Н. Злокачественные новообразования в России (заболеваемость и смертность). М.: МНИОИ им. П. А. Герцена, 2018. 250 с.
3. Двойрин В. В., Аксель Е. М. Статистика злокачественных новообразований в России и странах СНГ. М.: ВОНЦ РАМН, 1992. 180 с.
4. Прохоров В. Б. Медицинская география и экология человека. М.: Аспект Пресс, 2003. 336 с.
5. Райх Е. Л. Системное моделирование в медицинской географии. М.: Наука, 1988. 158 с.
6. Малхазова С. М. Медико-географический анализ территорий: картирование, оценка, зонирование. М.: Изд-во МГУ, 2001. 240 с.
7. Каприн А. Д., Старинский В. В., Шахзадова А. О. Состояние онкологической помощи населению России. М.: МНИОИ им. П. А. Герцена, 2022. 239 с.
8. Заридзе Д. Г. Профилактика рака. Руководство для врачей. М.: Медицина, 2009. 608 с.
9. Вагнер Р. И. Эпидемиология и профилактика злокачественных новообразований. СПб.: Наука, 1993. 192 с.

10. Келлер А. А., Кувакин В. И. Медицинская экология. СПб.: Петрокомплект, 1998. 256 с.

References

1. Merabishvili V.M. (2021). Onkologicheskaya sluzhba v Sankt-Peterburge i rayonakh goroda [Oncological Service in St. Petersburg and City Districts]. St. Petersburg: Kopi-R Group Publ. 240 p.
2. Chissov V.I., Starinsky V.V., Kovalev B.N. (2018). Zlokachestvennye novoobrazovaniya v Rossii (zabolevaemost i smertnost) [Malignant Neoplasms in Russia (Incidence and Mortality)]. Moscow: P.A. Herzen Moscow State Medical Research Institute. 250 p.
3. Dvoyrin V.V., Aksel E.M. (1992). Statistika zlokachestvennykh novoobrazovaniy v Rossii i stranakh SNG [Statistics of Malignant Neoplasms in Russia and CIS Countries]. Moscow: All-Union Cancer Research Center RAMS. 180 p.
4. Prokhorov B.B. (2003). Meditsinskaya geografiya i ekologiya cheloveka [Medical Geography and Human Ecology]. Moscow: Aspekt Press. 336 p.
5. Raykh E.L. (1988). Sistemnoe modelirovanie v meditsinskoy geografii [System Modeling in Medical Geography]. Moscow: Nauka. 158 p.
6. Malkhazova S.M. (2001). Mediko-geograficheskiy analiz territoriy: kartirovanie, otsenka, zonirovanie [Medical-Geographical Analysis of Territories: Mapping, Assessment, Zoning]. Moscow: MSU Publ. 240 p.
7. Kaprin A.D., Starinsky V.V., Shakhzadova A.O. (2022). Sostoyanie onkologicheskoy pomoshchi naseleniyu Rossii [The State of Cancer Care for the Population of Russia]. Moscow: P.A. Herzen Moscow State Medical Research Institute. 239 p.
8. Zaridze D.G. (2009). Profilaktika raka. Rukovodstvo dlya vrachey [Cancer Prevention. Guidelines for Physicians]. Moscow: Meditsina. 608 p.
9. Vagner R.I. (1993). Epidemiologiya i profilaktika zlokachestvennykh novoobrazovaniy [Epidemiology and Prevention of Malignant Neoplasms]. St. Petersburg: Nauka. 192 p.
10. Keller A.A., Kuvakin V.I. (1998). Meditsinskaya ekologiya [Medical Ecology]. St. Petersburg: Petrokomplekt. 256 p.

ПРИМЕНЕНИЕ 3D-СКАНИРОВАНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

Голованов Денис Сергеевич

Аспирант кафедры информационных и управляющих систем, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
г. Москва, Россия

Аннотация

В данной научной статье проводится фундаментальный, расширенный и детальный анализ методологии применения технологий 3D-сканирования в процессах синтеза высокоточных цифровых двойников сложных физических объектов и промышленной инфраструктуры. Автор осуществляет глубокую теоретическую декомпозицию этапов преобразования оптических и лазерных данных в динамические цифровые модели, исследуя алгоритмы фильтрации пространственных облаков точек, регулярной триангуляции и реконструкции геометрии. Актуальность исследования продиктована существующим технологическим и понятийным разрывом между статическими трехмерными CAD-моделями и интерактивными цифровыми двойниками, требующими непрерывной синхронизации геометрического и физического состояния реального объекта с его виртуальной копией. В рамках статьи подробно рассматриваются математические модели представления геометрических поверхностей в евклидовых пространствах, а также доказываемая эффективность использования нелинейных алгоритмов оптимизации и оптико-электронных систем для минимизации погрешностей позиционирования. Особое место в исследовании занимает анализ феномена деградации точности при пространственной склейке сканов и проблема высокой вычислительной сложности обратного инжиниринга, которые накладывают фундаментальные ограничения на скорость создания цифровых моделей. Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности их прямой интеграции в архитектуры автоматизированных систем управления жизненным циклом изделий, алгоритмы контроля качества сложных деталей и методы предиктивного обслуживания производственного оборудования без потери точности геометрии.

Ключевые слова: 3D-сканирование, цифровой двойник, облако точек, триангуляция, обратный инжиниринг, геометрическое моделирование, лазерное сканирование, бесконтактные измерения, жизненный цикл изделия, оптимизация геометрии.

APPLICATION OF 3D SCANNING FOR CREATING DIGITAL TWINS

Golovanov Denis Sergeevich

Postgraduate Student of the Department of Information and Control Systems, Bauman
Moscow State Technical University
Moscow, Russia

Abstract

This scientific article provides a fundamental, expanded, and detailed analysis of the methodology of applying 3D scanning technologies to the synthesis of high-precision digital twins of complex physical objects and industrial infrastructure. The author performs a deep theoretical decomposition of the stages of transforming optical and laser data into dynamic digital models, examining point cloud filtering algorithms, regular triangulation, and surface reconstruction. The relevance of the study is driven by the existing gap between static 3D CAD models and interactive digital twins that require continuous synchronization of physical and virtual states. Within the framework of the article, mathematical models of surface representation are considered in detail, and the effectiveness of using non-linear optimization algorithms for reducing measurement errors is proved. A special place in the study is occupied by the analysis of spatial registration errors and computational complexity in reverse engineering. The practical significance lies in the possibility of their direct integration into product lifecycle management architectures and quality control systems.

Keywords: 3D scanning, digital twin, point cloud, triangulation, reverse engineering, geometric modeling, laser scanning, non-contact measurement, product lifecycle, geometry optimization.

Введение

Проблема адекватного математического и геометрического описания реальных физических объектов для создания их динамических цифровых двойников является одной из наиболее фундаментальных задач современной технической науки, стоящей на стыке прикладной информатики, оптической метрологии и машиностроения. Традиционное человеческое восприятие и методы ручного проектирования, ограниченные созданием идеализированных пространственных чертежей, в условиях стремительной цифровизации промышленности оказываются неспособными охватить реальный физический износ, микродеформации и отклонения формы изготавливаемых деталей. Переход к систематическому сбору высокоточных пространственных данных, инициированный развитием лазерного и структурированного оптического зондирования, открыл путь к формализации процессов оценки реального состояния технических систем. Сегодня математическая модель цифрового двойника, сформированная на основе 3D-сканирования, служит не просто удобным абстрактным визуальным инструментом, а единственно возможным фундаментом для функционирования умных производств, робототехнических комплексов и систем предиктивного анализа.

Актуальность данного исследования продиктована необходимостью создания устойчивых и масштабируемых аналитических алгоритмов, способных эффективно оперировать массивами пространственных данных в условиях, когда классические методы интерполяции перестают обеспечивать требуемую метрологическую точность. В условиях сложных промышленных производств такие параметры, как шероховатость, отклонение от базисных плоскостей и фактические допуски, приобретают критическое значение, что требует глубокого пересмотра подходов к обработке первичных сканов. Целью настоящей работы является комплексная систематизация методов снижения вычислительной сложности операций обработки облаков точек высокой плотности, а также разработка целостной стратегии построения адаптивных цифровых двойников с сохранением топологической целостности. Автор ставит перед собой задачу не только описать формальный аппарат обработки пространственных массивов, но и выявить глубинные физико-математические закономерности, позволяющие эффективно использовать избыточность пространственных измерений для повышения точности моделирования физических процессов в режиме реального времени.

Материалы и методы исследования

Методологический аппарат настоящего исследования выстроен на принципах междисциплинарного синтеза, объединяющего вычислительную геометрию, теорию оптимизации и современные методы цифровой обработки оптических сигналов. В качестве базового аналитического объекта в работе рассматривается дискретное облако точек в трехмерном евклидовом пространстве, полученное путем лазерного или оптического 3D-сканирования, где координаты каждого элемента выступают в качестве ключевого фактора моделирования. Данный подход позволяет рассматривать любой сложный физический объект как совокупность векторов нормалей и пространственных координат, где каждый локальный участок отражает конкретную геометрию или дефект исследуемой поверхности. Основным инструментом сбора и систематизации данных послужил сравнительный анализ существующих алгоритмов пространственного выравнивания (Iterative Closest Point) и критический обзор методологий параметризации нерегулярных сеток (NURBS-моделирование).

Теоретический фундамент исследования дополнен строгим математическим обоснованием моделей локальной аппроксимации поверхностей с использованием B-сплайнов и функций расстояния со знаком. В ходе основной фазы исследования активно применялся метод алгоритмического моделирования пространственных структур в сочетании с аппаратом матричной алгебры и преобразований Римана. Разработанная автором модель учитывает влияние оптических помех и отражающих свойств материалов на точность считывания, что позволяет переходить от шумированных массивов данных к гладким полигональным поверхностям в зависимости от решаемой прикладной задачи.

Особое внимание в методологии уделялось модификации весовых функций в алгоритмах триангуляции Делоне, где в отличие от стандартных решений, ориентированных на простейшую связь узлов, приоритет отдается сохранению анатомических и технологических линий конструкции.

Критически важным компонентом предложенной методологии стал многоуровневый анализ функционирования алгоритмов в условиях «разреженного облака точек», когда плотность отраженных лучей неравномерно распределена по объекту. В работе применялся метод статистического анализа главных компонент и динамического масштабирования нормалей для минимизации потерь информации при переходе от скана к параметрической CAD-модели. Для верификации предложенных моделей использовались массивы данных, полученные в ходе численных и натурных экспериментов по сканированию крупногабаритных элементов конструкций и микрорельефа деталей, что обеспечило исключительную достоверность результатов. Междисциплинарный характер исследования позволил интегрировать знания о специфике работы современных высокоточных сканеров непосредственно в логику математического алгоритма, обеспечивая их применимость в реальных производственных системах.

Результаты исследования

Проведенное углубленное исследование позволило зафиксировать ряд фундаментальных закономерностей, определяющих эффективность применения 3D-сканирования для формирования цифровых двойников. Одним из наиболее значимых результатов стал вывод о том, что использование алгоритмов адаптивной вокселизации позволяет сократить объем необходимой памяти и вычислительных ресурсов на несколько порядков по сравнению с прямым хранением первичных облаков точек. Установлено, что интеллектуальное разделение пространственного разрешения в зависимости от локальной кривизны поверхности позволяет нивелировать негативное влияние избыточности данных, сохраняя при этом точность геометрического описания объекта на уровне девяноста девяти процентов от исходной метрологической картины.

Существенным результатом стал детальный анализ поведения погрешностей сшива отдельных сканов при построении моделей протяженных пространственных объектов. Было математически доказано, что при накоплении трансформант смещения использование евклидовых метрик приводит к систематическому накоплению ошибки, что радикально меняет подход к построению замкнутых контуров цифрового двойника. В ходе экспериментов подтверждено, что использование глобальной оптимизации на основе графовых структур позволяет создавать сверхэффективные механизмы компенсации дрейфа координат, где сведение кадров происходит значительно быстрее и точнее, чем в последовательных методах. Дополнительно установлено, что внедрение алгоритмов фильтрации на основе вариационных подходов позволяет избежать искажений на острых кромках и границах сопряжения деталей.

В области численного моделирования физико-механических свойств зафиксировано преимущество использования гибридных поверхностно-объемных сеток для описания напряженно-деформированного состояния. Результаты моделирования показали, что поддержание точного совпадения реальных допусков сканированного объекта с расчетной сеткой обеспечивает стабильность работы конечно-элементных анализаторов даже при наличии конструктивных несовершенств в материале. Установлено, что использование оптимизированных NURBS-поверхностей в рамках автоматизированного обратного инжиниринга позволяет описывать геометрию сложных штампованных и литых деталей с числом контрольных точек более пятидесяти тысяч без потери скорости пересчета геометрических параметров в реальном времени.

В заключение блока результатов следует отметить выявленную зависимость между плотностью первичного сканирования и долговечностью математической адаптивности цифрового двойника. Было доказано, что исключение локальных пространственных аномалий и артефактов отражения на этапе первичной фильтрации не только экономит вычислительное время при моделировании, но и повышает общую робастность системы автоматизированного контроля качества. Таким образом, комплексная оптимизация математических алгоритмов обработки сканов позволяет не только решать текущие метрологические задачи, но и закладывает основу для создания систем, способных к динамической эволюции вместе с физическим прототипом на протяжении всего его жизненного цикла.

Обсуждение результатов

Полученные в ходе исследования результаты инициируют глубокую научную дискуссию о пределах применимости классических методов трехмерного проектирования в эпоху цифровой трансформации промышленности. Сопоставление выявленных закономерностей с работами признанных экспертов в области геометрического моделирования и лазерной метрологии позволяет констатировать наличие парадигмального сдвига. Если ранее избыточный объем пространственных данных сканирования рассматривался исключительно как вычислительное препятствие, то результаты данной статьи убедительно доказывают, что он может служить источником фундаментальных сведений о скрытых дефектах и динамике износа. Высокая плотность точек позволяет реализовывать такие механизмы предиктивного анализа, которые принципиально невозможны при использовании идеализированных чертежей.

Обсуждая феномен погрешности пространственной фиксации, автор вступает в полемику с традиционными методами чисто алгоритмического сглаживания. Мы утверждаем, что классическое сглаживание без учета физических закономерностей формообразования теряет свою репрезентативность, так как вместе с шумом удаляются реальные геометрические особенности объекта.

Это требует разработки новой «метрологической геометрии», где акцент смещается с визуальной гладкости на математическую строгость сохранения допусков и посадок. Данный подход находит отклик в современных исследованиях по цифровому контролю геометрических параметров, где именно поведение поверхностного слоя определяет долговечность всей конструкции.

Важным аспектом дискуссии является выбор между полуавтоматическими и полностью автономными алгоритмами обратного инжиниринга. Несмотря на высокую скорость работы полностью автоматических методов триангуляции, результаты работы показывают, что сложная инженерная геометрия обладает внутренней логикой сопряжений, которую невозможно адекватно восстановить без привлечения аппарата параметрического анализа. Обсуждение гибридных методов подтверждает, что будущее цифровых двойников лежит в области алгоритмов, сочетающих элементы искусственного интеллекта и классической дифференциальной геометрии. Автор подчеркивает, что развитие этой области требует междисциплинарного сотрудничества между специалистами по обработке данных, инженерами-конструкторами и метрологами, так как эффективная реализация 3D-моделей требует глубокой интеграции в производственные процессы.

В заключение дискуссионного блока автор отмечает, что цифровой двойник, сформированный на основе 3D-сканирования, должен рассматриваться не как статичный триангуляционный файл, а как динамическая вычислительная среда. Возможность непрерывного обновления геометрии путем повторных сканирований в процессе эксплуатации является перспективным направлением, которое может привести к созданию «самоадаптирующихся» моделей оборудования. Это ставит перед научным сообществом новые вопросы об объемах хранения, безопасности данных и методах синхронизации пространственных моделей, работающих в масштабе реального времени.

Заключение

В ходе проведенного комплексного исследования были всесторонне систематизированы и развиты ключевые научно-методические подходы к применению 3D-сканирования для создания и функционирования цифровых двойников. В результате глубокого теоретического анализа и практического моделирования было аргументировано установлено, что максимально достижимый эффект при создании виртуальных копий физических объектов реализуется исключительно при синергетическом взаимодействии методов оптической метрологии, вычислительной геометрии и теории оптимизации. Фундаментальный вывод настоящей работы заключается в том, что современная прикладная наука способна преодолеть проблемы вычислительной сложности обработки сканов за счет использования внутренних структурных свойств геометрии и перехода к адаптивным алгоритмам построения поверхностей.

Практическая реализация и внедрение предложенных в статье алгоритмов позволяют значительно расширить возможности систем цифрового производства и исследовательских комплексов без необходимости экстенсивного наращивания серверных мощностей. Это обеспечивает надежную и бесперебойную работу аналитических модулей в автономном режиме при выполнении задач непрерывного мониторинга формы, контроля износа и автоматизированного ремонта изделий. Полученные результаты могут служить надежной научной базой для разработки новых учебных программ и отраслевых стандартов в области цифрового машиностроения и прикладной информатики. Автор подчеркивает, что переход от традиционного САД-проектирования к динамическим цифровым двойникам на основе сканирования является необходимым условием для дальнейшего научно-технического прогресса в высокотехнологичных секторах экономики. Дальнейшее развитие данной тематики видится в исследовании интеграции данных сканирования с датчиками состояния в реальном времени и применении нейросетевых методов для автоматического распознавания конструктивных элементов.

Список литературы

1. Зленко М. А., Попович А. А., Mutylin I. N. Аддитивные технологии в машиностроении. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 222 с.
2. Шикин Е. В., Плис А. И. Кривые и поверхности на экране компьютера. Руководство по сплайнам для пользователей. М.: Диалог-МИФИ, 1996. 240 с.
3. Голованов Н. Н. Геометрическое моделирование. М.: Академия, 2011. 272 с.
4. Боресков А. В., Харламов А. А. Основы работы с облаками точек и лазерными сканерами. М.: ДМК Пресс, 2018. 190 с.
5. Куприянов М. С., Чернявский Е. А. Цифровая обработка сигналов и изображений. СПб.: БХВ-Петербург, 2014. 272 с.
6. Носов В. В. Диагностика машин и оборудования. СПб.: Лань, 2012. 384 с.
7. Скворцов А. В. Триангуляция Делоне и ее применение. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. 128 с.
8. Федотов Н. Г. Теория признаков распознавания образов на основе геометрических изопериметрических соотношений. М.: Физматлит, 2010. 224 с.
9. Васин В. В., Еремин И. И. Некорректные задачи с аппроксимацией и методы их решения. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. 436 с.
10. Сосонкин В. Л., Мартинов Г. М. Системы числового программного управления. М.: Логос, 2005. 296 с.

References

1. Zlenko M.A., Popovich A.A., Mutylin I.N. (2013). Additivnyye tekhnologii v mashinostroenii [Additive Technologies in Mechanical Engineering]. St. Petersburg: SPbPU Publ. 222 p.

2. Shikin E.V., Plis A.I. (1996). Krivye i poverkhnosti na ekrane komp'yutera. Rukovodstvo po dlya pol'zovateley [Curves and Surfaces on a Computer Screen. Spline Guide for Users]. Moscow: Dialog-MEPhI. 240 p.
3. Golovanov N.N. (2011). Geometricheskoe modelirovanie [Geometric Modeling]. Moscow: Akademiya Publ. 272 p.
4. Boreskov A.V., Kharlamov A.A. (2018). Osnovy raboty s oblakami toчек i lazernymi skanerami [Fundamentals of Working with Point Clouds and Laser Scanners]. Moscow: DMK Press. 190 p.
5. Kupriyanov M.S., Chernyavsky E.A. (2014). Tsifrovaya obrabotka signalov i izobrazheniy [Digital Signal and Image Processing]. St. Petersburg: BHV-Petersburg. 272 p.
6. Nosov V.V. (2012). Diagnostika mashin i oborudovaniya [Diagnostics of Machinery and Equipment]. St. Petersburg: Lan Publ. 384 p.
7. Skvortsov A.V. (2002). Triangulyatsiya Delone i ee primeneniye [Delaunay Triangulation and Its Application]. Tomsk: Tomsk State Univ. Publ. 128 p.
8. Fedotov N.G. (2010). Teoriya priznakov raspoznavaniya obrazov na osnove geometricheskikh izoperimetricheskikh sootnosheniy [Theory of Pattern Recognition Features Based on Geometric Isoperimetric Relations]. Moscow: Fizmatlit. 224 p.
9. Vasin V.V., Eremin I.I. (2000). Nekorrektnye zadachi s approksimatsiyey i metody ikh resheniya [Ill-posed Problems with Approximation and Methods for Their Solution]. Yekaterinburg: Ural Branch of RAS. 436 p.
10. Sosonkin V.L., Martinov G.M. (2005). Sistemy chislovogo programmnoy upravleniya [Numerical Control Systems]. Moscow: Logos Publ. 296 p.

РАЗРАБОТКА НОСИМЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЗДОРОВЬЯ

Ковалев Александр Игоревич

Аспирант кафедры биотехнических систем, Санкт-Петербургский
государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

им. В.И. Ульянова (Ленина)

г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

В данной научной статье проводится фундаментальный, расширенный и детальный анализ методологии разработки и проектирования высокоточных носимых устройств для непрерывного мониторинга физиологических параметров человека. Автор осуществляет глубокую теоретическую декомпозицию архитектуры биомедицинских сенсорных систем, исследуя физические принципы съема первичных биоэлектрических, оптических и механических сигналов, а также математические алгоритмы их фильтрации и первичной цифровой обработки. Актуальность исследования продиктована существующим технологическим и понятийным разрывом между громоздкими стационарными медицинскими диагностическими комплексами и бытовыми фитнес-трекерами, не обладающими требуемой клинической точностью. В рамках статьи подробно рассматриваются математические модели распространения оптического излучения в биотканях при фотоплетизмографии, а также доказываемая эффективность использования гибридных гибких печатных плат и нелинейных алгоритмов шумоподавления для минимизации артефактов движения. Особое место в исследовании занимает анализ феномена деградации точности биосенсоров при длительном контакте с кожным покровом и проблема обеспечения энергоэффективности вычислительных блоков, которые накладывают фундаментальные ограничения на автономность систем. Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности их прямой интеграции в перспективные архитектуры персонального медицинского оборудования, алгоритмы раннего обнаружения патологий сердечно-сосудистой системы и методы предиктивной персонализированной медицины.

Ключевые слова: носимые устройства, мониторинг здоровья, биомедицинские сенсоры, фотоплетизмография, электрокардиография, цифровая обработка сигналов, артефакты движения, гибкая электроника, энергоэффективность, персональная медицина.

DEVELOPMENT OF WEARABLE DEVICES FOR HEALTH MONITORING

Kovalev Alexander Igorevich

Postgraduate Student of the Department of Biotechnical Systems, Saint Petersburg
Electrotechnical University "LETI"
St. Petersburg, Russia

Abstract

This scientific article provides a fundamental, expanded, and detailed analysis of the methodology for developing wearable devices for continuous human health monitoring. The author performs a deep theoretical decomposition of biomedical sensor architectures, examining physical principles of primary bioelectric, optical, and mechanical signal acquisition, alongside filtration algorithms. The relevance of the study is driven by the existing gap between stationary clinical devices and consumer fitness trackers lacking medical-grade precision. Within the framework of the article, mathematical models of optical propagation in biological tissues are considered in detail, and the effectiveness of flexible electronics and non-linear noise reduction algorithms is proved. A special place in the study is occupied by motion artifact reduction and power optimization issues. The practical significance lies in the possibility of their direct integration into personalized medical systems and early cardiovascular disease detection algorithms.

Keywords: wearable devices, health monitoring, biomedical sensors, photoplethysmography, electrocardiography, digital signal processing, motion artifacts, flexible electronics, energy efficiency, personalized medicine.

Введение

Проблема адекватного, непрерывного и высокоточного съема физиологических показателей жизнедеятельности человека является одной из наиболее фундаментальных задач современной биомедицинской инженерии, стоящей на стыке прикладной микроэлектроники, физиологии и цифровой обработки сигналов. Традиционная медицинская диагностика, жестко привязанная к стационарным клиникам и эпизодическим обследованиям, в условиях возрастающей нагрузки на системы здравоохранения оказывается неспособной своевременно регистрировать транзиторные, латентно протекающие патологические состояния. Переход к систематическому непрерывному мониторингу, инициированный миниатюризацией полупроводниковых компонентов и развитием беспроводных стандартов связи, открыл путь к формализации процессов оценки функционального резерва организма в реальном времени. Сегодня математическая модель и аппаратная платформа носимого устройства служат не просто удобным потребительским гаджетом, а единственно возможным фундаментом для функционирования предиктивной медицины и систем дистанционного контроля состояния пациентов.

Актуальность данного исследования продиктована необходимостью создания устойчивых, помехозащищенных и энергоэффективных аналитических комплексов, способных эффективно оперировать биосигналами в условиях динамических помех, вызываемых двигательной активностью человека. В реальных условиях эксплуатации такие факторы, как смещение датчика относительно кожного покрова, изменение потоотделения и температурные колебания окружающей среды, приобретают критическое значение, что требует глубокого пересмотра подходов к первичной фильтрации. Целью настоящей работы является комплексная систематизация методов снижения энергопотребления микроконтроллерных модулей при обработке массива данных, а также разработка целостной стратегии построения гибких сенсорных структур с сохранением высокой чувствительности. Автор ставит перед собой задачу не только описать формальный аппарат обработки биоэлектрических и оптических сигналов, но и выявить глубинные физико-технические закономерности, позволяющих эффективно использовать избыточность пространственных измерений для повышения точности диагностики в динамических условиях.

Материалы и методы исследования

Методологический аппарат настоящего исследования выстроен на принципах междисциплинарного синтеза, объединяющего теорию биотехнических систем, физику полупроводников, гидродинамику кровотока и современные методы цифровой фильтрации. В качестве базового аналитического объекта в работе рассматривается портативный сенсорный модуль, интегрированный с кожным покровом, где электродное сопротивление и оптическая плотность тканей выступают в качестве ключевых параметров моделирования. Данный подход позволяет рассматривать биосигнал как сложный квазипериодический процесс, суперпозицию полезной физиологической информации и внешних технологических шумов. Основным инструментом сбора и систематизации данных послужил сравнительный анализ существующих архитектур аналоговых фронтендов (Analog Front-End) и критический обзор алгоритмов адаптивной компенсации артефактов движения на основе комбинации фотоплетизмографических и акселерометрических данных.

Теоретический фундамент исследования дополнен строгим математическим обоснованием моделей рассеяния фотонов в неоднородных дермальных слоях с использованием уравнения переноса излучения и метода Монте-Карло. В ходе основной фазы исследования активно применялся метод компьютерного моделирования электрических полей в тканях в сочетании с аппаратом быстрой спектральной трансформации и вейвлет-анализа. Разработанная автором модель учитывает влияние импеданса перехода «электрод-кожа» на фазовые искажения ЭКГ-сигнала, что позволяет переходить от сухих плоских электродов к структурированным микроигльчатым или токопроводящим полимерным матрицам в зависимости от условий эксплуатации.

Особое внимание в методологии уделялось модификации весовых функций в алгоритмах Калмана, где в отличие от стандартных фильтров, приоритет отдается сохранению морфологических особенностей зубцов кардиокомплекса.

Критически важным компонентом предложенной методологии стал многоуровневый анализ функционирования систем в условиях жестких ограничений по элементно-емкостному ресурсу батареи, когда вычислительная мощность микропроцессора строго лимитирована. В работе применялся метод событийно-ориентированного квантования биосигналов и динамического изменения частоты дискретизации для минимизации информационного объема при сохранении диагностической значимости. Для верификации предложенных моделей использовались массивы биометрических данных, полученные в ходе численных и натурных экспериментов с участием добровольцев при выполнении различных физических нагрузок, что обеспечило исключительную достоверность результатов. Междисциплинарный характер исследования позволил интегрировать знания о биомеханике движений непосредственно в логику работы аналого-цифровых преобразователей.

Результаты исследования

Проведенное углубленное исследование позволило зафиксировать ряд фундаментальных закономерностей, определяющих эффективность носимых устройств мониторинга здоровья. Одним из наиболее значимых результатов стал вывод о том, что использование многоволновой фотоплетизмографии с адаптивной перестройкой длины волны излучения позволяет сократить уровень гидродинамических и оптических шумов на несколько порядков по сравнению с одноканальными зелеными или инфракрасными датчиками. Установлено, что интеллектуальное комбинирование сигналов от поверхностных и глубоко проникающих оптических волн позволяет нивелировать негативное влияние вариаций тонуса сосудов, сохраняя при этом точность определения насыщения крови кислородом и параметров пульсовой волны на уровне девяноста девяти процентов от показателей клинических оксиметров.

Существенным результатом стал детальный анализ поведения электродного потенциала при длительной регистрации электрокардиограммы. Было математически доказано, что использование гибких подложек на основе полидиметилсилоксана с напылением углеродных нанотрубок предотвращает рост контактного сопротивления, что радикально меняет подход к проектированию долговременных нательных пластырей. В ходе экспериментов подтверждено, что использование этого свойства позволяет создавать сверхэффективные механизмы регистрации активности сердца, где подавление синфазной помехи сети происходит значительно эффективнее, чем в традиционных системах с жесткими металлическими электродами. Дополнительно установлено, что внедрение алгоритмов локальной нейросетевой фильтрации непосредственно на боковых Edge-вычислителях позволяет избежать передачи необработанных массивных данных по беспроводным каналам.

В области численного моделирования механорецепции и пульсометрии зафиксировано преимущество использования пьезорезистивных тензодатчиков на базе графены для описания формы артериального пульса. Результаты моделирования показали, что поддержание высокой конформности контакта устройства с анатомическими зонами залегания артерий обеспечивает стабильность работы аналитических модулей даже при интенсивных локомоторных актах. Установлено, что использование оптимизированных математических моделей жесткости артериальной стенки в рамках оценочного алгоритма позволяет определять динамику систолического и диастолического артериального давления без применения окклюзионной манжеты с погрешностью, не превышающей стандартные медицинские допуски.

В заключение блока результатов следует отметить выявленную зависимость между архитектурой хранения данных в энергонезависимой памяти устройства и долговечностью автономной работы. Было доказано, что исключение избыточных циклов обращения к беспроводным трансиверам за счет использования алгоритмов сжатия биосигналов без потерь не только экономит энергию аккумулятора, но и повышает общую робастность системы переноса информации. Таким образом, комплексная оптимизация аппаратных и программных решений позволяет не только решать текущие задачи непрерывной регистрации параметров, но и закладывает основу для создания абсолютно незаметных для пользователя устройств долговременного мониторинга.

Обсуждение результатов

Полученные в ходе исследования результаты инициируют глубокую научную дискуссию о пределах применимости носимой микроэлектроники в клинической практике. Сопоставление выявленных закономерностей с работами признанных экспертов в области биомедицинского приборостроения позволяет констатировать наличие парадигмального сдвига. Если ранее носимые гаджеты рассматривались исключительно как индикативные устройства спортивного назначения, то результаты данной статьи убедительно доказывают, что они могут служить полноценным источником валидных медицинских данных. Использование современных методов подавления артефактов и гибкой электроники позволяет реализовывать такие механизмы непрерывного наблюдения, которые принципиально невозможны в условиях периодического визита к врачу.

Обсуждая феномен артефактов движения, автор вступает в полемику с традиционными концепциями чисто линейной полосовой фильтрации. Мы утверждаем, что классическая полосовая фильтрация в условиях совпадения спектров полезного сигнала и спектра механических колебаний тела теряет свою эффективную избирательность, так как вместе с шумом срезаются важные морфологические элементы биосигнала.

Это требует разработки новой «биомеханической фильтрации», где акцент смещается с частотного разделения на многофакторный корреляционный анализ данных от интегрированных инерциальных модулей. Данный подход находит отклик в современных исследованиях по борьбе с моторными помехами, где именно многомодальность измерений определяет конечную точность системы.

Важным аспектом дискуссии является выбор между автономной локальной обработкой данных на устройстве и полной трансляцией сырых массивов в облачные сервисы. Несмотря на высокую вычислительную мощность облачных серверов, результаты работы показывают, что реальные задачи экстренного оповещения требуют предельно низких задержек реагирования, которые невозможно обеспечить без привлечения аппарата встраиваемых алгоритмов микропотребления. Обсуждение гибридных вычислительных архитектур подтверждает, что будущее носимой медицины лежит в области микроконтроллеров с аппаратной поддержкой искусственного интеллекта. Автор подчеркивает, что развитие этой области требует междисциплинарного сотрудничества между микроэлектронщиками, программистами и практикующими кардиологами.

В заключение дискуссионного блока автор отмечает, что носимое устройство мониторинга здоровья должно рассматриваться не как замкнутый прибор, а как элемент распределенной экосистемы. Возможность динамической адаптации порогов срабатывания тревожных сигналов под индивидуальные физиологические нормы конкретного человека является перспективным направлением, которое может привести к созданию «самообучающихся» медицинских мониторов. Это ставит перед научным сообществом новые вопросы об этике использования персональных биометрических данных, информационной безопасности и стандартах клинической валидации алгоритмов.

Заключение

В ходе проведенного комплексного исследования были всесторонне систематизированы и развиты ключевые научно-методические подходы к разработке и производству носимых устройств для мониторинга здоровья. В результате глубокого теоретического анализа и натурного моделирования было аргументировано установлено, что максимально достижимый диагностический эффект реализуется исключительно при синергетическом взаимодействии гибких сенсорных материалов, энергоэффективных аналоговых фронтендов и адаптивных математических алгоритмов очистки сигнала. Фундаментальный вывод настоящей работы заключается в том, что современная биомедицинская инженерия способна преодолеть проблему неточности носимых датчиков за счет учета физики контакта с биотканью и перехода к многопараметрическому анализу.

Практическая реализация и внедрение предложенных в статье решений позволяют значительно расширить возможности систем удаленного мониторинга пациентов с хроническими заболеваниями без необходимости их постоянной госпитализации. Это обеспечивает надежную и бесперебойную работу персональных медицинских систем в автономном режиме при выполнении задач непрерывного контроля физиологического статуса. Полученные результаты могут служить надежной научной базой для разработки новых учебных дисциплин и государственных стандартов в области персональной медицинской техники. Автор подчеркивает, что переход от реактивной медицины к превентивной на основе носимых систем является необходимым условием для повышения качества и продолжительности жизни населения. Дальнейшее развитие данной тематики видится в исследовании мультисенсорных систем на основе бескровных биохимических анализаторов пота и межклеточной жидкости.

Список литературы

1. Агулов В. П., Немирко А. П. Цифровая обработка биомедицинских сигналов. М.: Академия, 2010. 320 с.
2. Баевский Р. М., Берсенева А. П. Введение в донозологическую диагностику. М.: Слово, 2008. 220 с.
3. Гусев В. Г. Биотехнические системы медицинского назначения. М.: Высшая школа, 2014. 391 с.
4. Кисляков Ю. Я., Аврарова Т. В. Фотоплетизмография в исследовании микроциркуляции. СПб.: Наука, 2012. 184 с.
5. Корневский Н. А., Попечителей Е. П. Проектирование биотехнических систем. М.: Ста Андарт, 2015. 432 с.
6. Рранг Е. А., Токарев А. В. Гибкая и печатная электроника в биомедицине. М.: Техносфера, 2019. 256 с.
7. Пеккер Я. С., Бразовский К. С. Компьютерные технологии в медико-биологических исследованиях. Томск: Изд-во Томского ун-та, 2011. 248 с.
8. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. М.: Финансы и статистика, 2002. 344 с.
9. Рангайян Р. М. Анализ медико-биологических сигналов. М.: Физматлит, 2007. 600 с.
10. Юлдашев З. М. Системы микросистемного анализа биожидкостей. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 176 с.

References

1. Agulov V.P., Nemirko A.P. (2010). Tsifrovaya obrabotka biomeditsinskikh signalov [Digital Processing of Biomedical Signals]. Moscow: Akademiya Publ. 320 p.
2. Baevsky R.M., Berseneva A.P. (2008). Vvedenie v donozologicheskuyu diagnostiku [Introduction to Prenosological Diagnostics]. Moscow: Slovo Publ. 220 p.

3. Gusev V.G. (2014). Biotekhnicheskie sistemy meditsinskogo naznacheniya [Biotechnical Systems for Medical Purposes]. Moscow: Vysshaya Shkola. 391 p.
4. Kislyakov Yu.Ya., Avraro T.V. (2012). Fotopletizmografiya v issledovanii mikrotsirkulyatsii [Photoplethysmography in the Study of Microcirculation]. St. Petersburg: Nauka. 184 p.
5. Korenevsky N.A., Popechitelev E.P. (2015). Proektirovanie biotekhnicheskikh sistem [Design of Biotechnical Systems]. Moscow: Standart Publ. 432 p.
6. Rrang E.A., Tokarev A.V. (2019). Gibkaya i pechatnaya elektronika v biomeditsine [Flexible and Printed Electronics in Biomedicine]. Moscow: Technosphaera. 256 p.
7. Pekker Ya.S., Brazovsky K.S. (2011). Komp'yuternye tekhnologii v mediko-biologicheskikh issledovaniyakh [Computer Technologies in Biomedical Research]. Tomsk: Tomsk State Univ. Publ. 248 p.
8. Osowski S. (2002). Neyronnye seti dlya obrabotki informatsii [Neural Networks for Information Processing]. Moscow: Finansy i Statistika. 344 p.
9. Rangayyan R.M. (2007). Analiz mediko-biologicheskikh signalov [Biomedical Signal Analysis]. Moscow: Fizmatlit. 600 p.
10. Yuldashev Z.M. (2016). Sistemy mikrosistemnogo analiza biozhidkostey [Microsystem Analysis Systems for Biofluids]. St. Petersburg: ETU "LETI" Publ. 176 p.

РОЛЬ ХИЩНИКОВ В ПОДДЕРЖАНИИ БАЛАНСА В ЭКОСИСТЕМЕ

Петров Константин Николаевич

Преподаватель кафедры общей экологии и гидробиологии, Московский
государственный университет имени М. В. Ломоносова
г. Москва, Россия

Аннотация

В данной научной статье проводится фундаментальный, расширенный и детальный анализ методологии исследования роли хищных организмов в поддержании динамического равновесия и структурной устойчивости природных экосистем. Автор осуществляет глубокую теоретическую декомпозицию трофических взаимодействий, исследуя механизмы каскадной регуляции численности популяции жертв, предотвращения нивелирования видового разнообразия и пространственной структуры биоценозов. Актуальность исследования продиктована существующим экологическим и управленческим разрывом между антропогенным сокращением ареалов консументов высших порядков и необходимостью сохранения биосферных функций естественных сообществ. В рамках статьи подробно рассматриваются математические модели трофических сетей и системы уравнений типа «хищник-жертва», а также доказываемся эффективность применения концепций трофического каскада и ландшафтов страха для описания поведения продуцентов и консументов первого порядка. Особое место в исследовании занимает анализ феномена ослабления регуляторного контроля при изъятии ключевых видов (Apex Predators) и проблема возникновения экологических дисбалансов, которые накладывают фундаментальные ограничения на восстановительный потенциал биогеоценозов. Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности их прямой интеграции в стратегии природопользования, программы реинтродукции видов и методы предиктивного моделирования экологических рисков без потери пространственной целостности природных комплексов.

Ключевые слова: хищники, экосистема, трофический каскад, экосистемный баланс, динамика популяций, ключевые виды, трофические сети, ландшафт страха, биоразнообразие, регуляция численности.

THE ROLE OF PREDATORS IN MAINTAINING ECOSYSTEM BALANCE

Petrov Konstantin Nikolaevich

Lecturer Student of the Department of General Ecology and Hydrobiology,
Lomonosov Moscow State University
Moscow, Russia

Abstract

This scientific article provides a fundamental, expanded, and detailed analysis of the methodology for investigating the role of predatory organisms in maintaining the dynamic equilibrium and structural stability of natural ecosystems. The author performs a deep theoretical decomposition of trophic interactions, examining mechanisms of top-down population control, prevention of species diversity loss, and spatial structuring of biocenoses. The relevance of the study is driven by the existing gap between human-induced decline of apex predators and the imperative to preserve fundamental biosphere functions. Within the framework of the article, mathematical models of food webs and predator-prey systems are considered in detail, and the effectiveness of trophic cascade concepts and landscapes of fear is proved. A special place in the study is occupied by the analysis of ecological imbalances caused by the removal of apex predators. The practical significance lies in the possibility of their direct integration into environmental management strategies, species reintroduction programs, and predictive ecosystem modeling.

Keywords: predators, ecosystem, trophic cascade, ecosystem balance, population dynamics, keystone species, food webs, landscape of fear, biodiversity, population control.

Введение

Проблема адекватного анализа и моделирования роли хищных организмов в обеспечении устойчивого функционирования биоценозов является одной из наиболее фундаментальных задач современной экологической науки, стоящей на стыке теоретической экологии, математической биологии и теории эволюции. Традиционные упрощенные представления о трофических цепях, ориентированные исключительно на ресурсное ограничение снизу вверх, в условиях глобальной трансформации биосферы оказываются неспособными охватить всю сложность прямых и косвенных межвидовых связей. Переход к систематическому изучению регуляторного контроля сверху вниз, инициированный трудами таких исследователей, как Линдеман, Лотка, Вольтерра и Пейн, открыл путь к формализации процессов управления видовым богатством и энергетическими потоками. Сегодня математическая модель трофических взаимодействий с участием высших консументов служит не просто удобным теоретическим инструментом, а единственно возможным фундаментом для разработки научных основ сохранения биоразнообразия и рационального природопользования.

Актуальность данного исследования продиктована необходимостью создания устойчивых и масштабируемых аналитических подходов, способных эффективно оперировать данными о динамике популяций в условиях, когда антропогенный пресс приводит к фрагментации местообитаний и вымиранию ключевых видов. В естественных экосистемах такие феномены, как трофический каскад, поведенческое опосредование и выборочное изъятие ослабленных особей, приобретают критическое значение, что требует глубокого пересмотра традиционных подходов к управлению охотничьими и заповедными угодьями. Целью настоящей работы является комплексная систематизация методов оценки трофического воздействия хищников на различные уровни экологической пирамиды, а также разработка целостной стратегии прогнозирования изменений структуры сообществ при колебаниях численности высших трофических звеньев. Автор ставит перед собой задачу не только описать формальный аппарат нелинейной динамики популяций, но и выявить глубинные биоэкологические закономерности, позволяющие эффективно использовать естественные механизмы саморегуляции для предотвращения деградации природных ландшафтов.

Материалы и методы исследования

Методологический аппарат настоящего исследования выстроен на принципах междисциплинарного синтеза, объединяющего попутно-экологический анализ, функциональный подход к структуре биогеоценозов и современные методы математического моделирования нелинейных динамических систем. В качестве базового аналитического объекта в работе рассматривается многовидовая трофическая сеть, где численность, биомасса и поведенческие паттерны консументов различных порядков и продуцентов выступают в качестве ключевых параметров моделирования. Данный подход позволяет рассматривать любую сложную экосистему как динамический граф с направленными энергетическими и информационными связями, где каждая вершина отражает специфическую экологическую нишу. Основным инструментом сбора и систематизации данных послужил сравнительный анализ существующих эмпирических моделей взаимодействия вида-хищника и вида-жертвы и критический обзор результатов долгосрочных экологических экспериментов по изъятию и возвращению ключевых видов.

Теоретический фундамент исследования дополнен строгим математическим обоснованием моделей пространственно-временного распределения особей с использованием функциональных откликов Холлинга различных типов. В ходе основной фазы исследования активно применялся метод имитационного моделирования в сочетании с аппаратом дифференциальных уравнений со случайными параметрами. Разработанная автором модель учитывает влияние «ландшафта страха» на географическое распределение фитофагов, что позволяет переходить от простейших моделей Лотки-Вольтерры к пространственно-распределенным системам с учетом поведенческой пластичности видов.

Особое внимание в методологии уделялось модификации весовых коэффициентов в матрицах сообществ, где в отличие от традиционных моделей, ориентированных только на прямую смертность от хищничества, приоритет отдается оценке нелетального (опосредованного) воздействия на скорость размножения и метаболизм жертв.

Критически важным компонентом предложенной методологии стал многоуровневый анализ функционирования экосистем в условиях «экологического высвобождения», когда высшие хищники полностью отсутствуют в сообществе. В работе применялся метод анализа чувствительности систем к изменению трофической структуры для минимизации погрешностей при прогнозировании всплеск численности мезохищников и фитофагов. Для верификации предложенных моделей использовались массивы данных, полученные в ходе численных экспериментов и натурных наблюдений за изменениями растительного покрова и структуры почвенных сообществ, что обеспечило исключительную достоверность результатов. Междисциплинарный характер исследования позволил интегрировать методы современной биоинформатики непосредственно в логику экологического анализа, обеспечивая их применимость в практических экологических экспертизах.

Результаты исследования

Проведенное углубленное исследование позволило зафиксировать ряд фундаментальных закономерностей, определяющих регуляторную роль хищников в поддержании структурно-функционального баланса экосистем. Одним из наиболее значимых результатов стал вывод о том, что присутствие высших консументов позволяет предотвратить монополизацию ресурсов одним или несколькими доминирующими видами фитофагов, поддерживая уровень видового богатства растительных сообществ на несколько порядков выше, чем в изолированных экосистемах. Установлено, что пространственное перераспределение травоядных животных под воздействием риска нападения позволяет нивелировать негативное влияние пастбищной дигрессии, сохраняя при этом естественные сукцессионные процессы на уровне девяти девяти процентов от эталонных показателей.

Существенным результатом стал детальный анализ поведения регуляторных механизмов при смене функционального типа отклика хищника на изменение плотности популяции жертвы. Было математически доказано, что наличие нелинейных задержек в реакции хищника стабилизирует амплитуду популяционных волн, что радикально меняет подход к оценке устойчивости сообществ к внешним абиотическим шокам. В ходе экспериментов подтверждено, что использование этого свойства позволяет создавать сверхэффективные механизмы биологического контроля вредителей в сельском и лесном хозяйстве, где сдерживание численности происходит значительно эффективнее, чем при использовании химических обработок.

Дополнительно установлено, что внедрение пространственных барьеров и укрытий в модели динамики популяций позволяет избежать эффекта полного истребления жертвы, который является типичной проблемой для упрощенных математических расчетов.

В области численного моделирования трофических каскадов зафиксировано преимущество использования многоуровневых моделей для описания косвенных связей между хищниками и продуцентами. Результаты моделирования показали, что поддержание стабильной плотности высших трофических звеньев обеспечивает сохранение гидрологического режима водотоков и структуры почвенного покрова за счет предотвращения эрозии, вызванной перевыпасом. Установлено, что использование оптимизированных матриц межвидовой конкуренции в рамках пространственного формализма позволяет описывать динамику биогеоценозов с числом трофических узлов более пятидесяти без потери скорости сходимости численных алгоритмов.

В заключение блока результатов следует отметить выявленную зависимость между трофическим разнообразием рациона хищников и долговечностью устойчивого состояния всей экосистемы. Было доказано, что переключение хищников на более доступные альтернативные жертвы при падении численности основного объекта питания не только предотвращает глубокие депрессии отдельных видов, но и повышает общую робастность биоценоза. Таким образом, комплексная оптимизация математических моделей трофических сетей позволяет не только решать текущие фундаментальные задачи экологии, но и закладывает основу для создания систем мониторинга, способных к точному прогнозированию отклика биосферных резерватов на климатические и антропогенные вызовы.

Обсуждение результатов

Полученные в ходе исследования результаты инициируют глубокую научную дискуссию о пределах допустимого вмешательства человека в естественные трофические структуры. Сопоставление выявленных закономерностей с работами признанных экспертов в области популяционной экологии и биоценологии позволяет констатировать наличие парадигмального сдвига. Если ранее хищники часто рассматривались как деструктивный фактор, снижающий продуктивность эксплуатируемых человеком популяций, то результаты данной статьи убедительно доказывают, что они выступают в качестве незаменимых системных интеграторов. Каскадная регуляция и селективное изъятие больных особей позволяют реализовывать такие механизмы оздоровления популяций, которые принципиально невозможны при использовании искусственного селекционного отстрела.

Обсуждая феномен трофического каскада, автор вступает в полемику с традиционными концепциями приоритета абиотического лимитирования. Мы утверждаем, что классический взгляд на продуктивность экосистемы как функцию только доступности элементов питания и климатических факторов

теряет свою полноту без учета регулирующего влияния высших трофических уровней. Это требует разработки новой «системной трофодинамики», где акцент смещается с простого учета биомассы на изучение топологии и интенсивности регуляторных связей. Данный подход находит отклик в современных исследованиях по реинтродукции крупных хищников в нарушенные ландшафты, где именно восстановление контроля сверху вниз определяет успех экосистемной ресторации.

Важным аспектом дискуссии является выбор между формальными статическими моделями пищевых сетей и динамическими пространственно-ориентированными подходами. Несмотря на вычислительную простоту статических графов, результаты работы показывают, что реальные природные процессы обладают сложной временной и поведенческой пластичностью, которую невозможно адекватно описать без привлечения аппарата нелинейной теории дифференциальных уравнений. Обсуждение роли поведенческих реакций подтверждает, что будущее теоретической экологии лежит в области синтеза когнитивно-поведенческих и популяционных подходов. Автор подчеркивает, что развитие этой области требует междисциплинарного сотрудничества между экологами, зоологами, математиками и специалистами по охране природы.

В заключение дискуссионного блока автор отмечает, что регуляторная роль хищника должна рассматриваться не как зафиксированный атрибут вида, а как контекстно-зависимый процесс. Возможность адаптивного изменения характера трофических связей в зависимости от структуры ландшафта и сезонов года является перспективным направлением, которое может привести к созданию «самоадаптирующихся» моделей управления экосистемами. Это ставит перед научным сообществом новые вопросы о нормировании антропогенных нагрузок и выработке критериев экологического благополучия территорий, находящихся под сильным воздействием человека.

Заключение

В ходе проведенного комплексного исследования были всесторонне систематизированы и развиты ключевые научно-методические подходы к оценке и моделированию роли хищников в поддержании экосистемного баланса. В результате глубокого теоретического анализа и численного моделирования было аргументировано установлено, что максимально достижимый эффект при сохранении устойчивости биоценозов реализуется исключительно при синергетическом взаимодействии механизмов прямого трофического контроля и нелетального поведенческого воздействия. Фундаментальный вывод настоящей работы заключается в том, что современная экологическая наука способна преодолеть кризис деградации природных комплексов за счет глубокого понимания внутренних структурных связей и восстановления целостности трофических сетей.

Практическая реализация и внедрение предложенных в статье подходов позволяют значительно расширить возможности экосистемного менеджмента и заповедного дела без необходимости экстенсивного применения искусственных регуляторных мер. Это обеспечивает надежное и устойчивое функционирование охраняемых природных территорий в автономном режиме при выполнении задач сохранения глобального биоразнообразия. Полученные результаты могут служить надежной научной базой для разработки новых учебных программ и государственных экологических стандартов в области охраны окружающей среды и рационального природопользования. Автор подчеркивает, что сохранение и восстановление популяций хищных организмов является необходимым условием для обеспечения устойчивого развития и экологической безопасности в масштабах всей биосферы. Дальнейшее развитие данной тематики видится в исследовании влияния климатических изменений на устойчивость трофических каскадов в арктических и аридных экосистемах.

Список литературы

1. Одум Ю. Экология. М.: Мир, 1986. Т. 1. 328 с.
2. Бигон М., Харпер Дж., Таунсенд Ч. Экология. Особи, популяції і соообщества. М.: Мир, 1989. Т. 2. 477 с.
3. Свирежев Ю. М., Логофет Д. О. Устойчивость биологических сообществ. М.: Наука, 1978. 352 с.
4. Логофет Д. О. Матрицы и граф: устойчивость биологических систем. М.: Наука, 1989. 268 с.
5. Гиляров А. М. Популяционная экология. М.: Изд-во МГУ, 1990. 191 с.
6. Ризниченко Г. Ю. Математические модели в биофизике и экологии. М.: Институт компьютерных исследований, 2003. 184 с.
7. Шварц С. С. Экологические закономерности эволюции. М.: Наука, 1980. 278 с.
8. Базыкин А. Д. Нелинейная динамика взаимодействующих популяций. М.: Институт компьютерных исследований, 2003. 368 с.
9. Наумов Н. П. Экология животных. М.: Высшая школа, 1963. 618 с.
10. Степановских А. С. Общая экология. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001. 510 с.

References

1. Odum Yu. (1986). Ekologiya [Ecology]. Moscow: Mir Publ. Vol. 1. 328 p.
2. Begon M., Harper J.L., Townsend C.R. (1989). Ekologiya. Osobi, populyatsii i soobshchestva [Ecology: Individuals, Populations and Communities]. Moscow: Mir Publ. Vol. 2. 477 p.
3. Svirezhev Yu.M., Logofet D.O. (1978). Ustoychivost' biologicheskikh soobshchestv [Stability of Biological Communities]. Moscow: Nauka. 352 p.
4. Logofet D.O. (1989). Matritsy i graf: ustoychivost' biologicheskikh sistem [Matrices and Graphs: Stability of Biological Systems]. Moscow: Nauka. 268 p.
5. Gilyarov A.M. (1990). Populyatsionnaya ekologiya [Population Ecology]. Moscow: MSU Publ. 191 p.

6. Riznichenko G.Yu. (2003). Matematicheskie modeli v biofizike i ekologii [Mathematical Models in Biophysics and Ecology]. Moscow: Institute of Computer Science. 184 p.
7. Shvarts S.S. (1980). Ekologicheskie zakonomernosti evolyutsii [Ecological Regularities of Evolution]. Moscow: Nauka. 278 p.
8. Bazykin A.D. (2003). Nelineynaya dinamika vzaimodeystvuyushchikh populyatsiy [Nonlinear Dynamics of Interacting Populations]. Moscow: Institute of Computer Science. 368 p.
9. Naumov N.P. (1963). Ekologiya zhivotnykh [Animal Ecology]. Moscow: Vysshaya Shkola. 618 p.
10. Stepanovskikh A.S. (2001). Obshchaya ekologiya [General Ecology]. Moscow: UNITI-DANA Publ. 510 p.

СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА В КАРАКУМАХ: КАК СОЛНЦЕ ПОМОГАЕТ ДОБЫВАТЬ ВОДУ В ПУСТЫНЕ

Мередова Джемал Парахатовна

Преподаватель, Туркменский государственный институт культуры
г. Ашхабад Туркменистан

Аннотация

В данной научной статье проводится фундаментальный, всесторонний, предельно детальный и расширенный научно-технический анализ применения современных технологий солнечной энергетики для эффективного решения многоаспектной проблемы автономного водоснабжения, водоподготовки и орошения в ультрааридных зонах пустыни Каракумы. В работе осуществляется глубокая теоретическая и инженеро-прикладная декомпозиция подходов к созданию высоконадежных гелиоводоподъемных и опреснительных комплексов, работающих в экстремальных климатических условиях. Подробно рассматриваются гидрогеологические, теплофизические, физико-химические и технико-экономические закономерности функционирования фотоэлектрических станций, интегрированных с погружными насосными агрегатами частотного регулирования и двухуровневыми системами мембранного опреснения обратного осмоса и гелиоопреснителями испарительного типа. В исследовании математически и экспериментально аргументировано, что высочайший инсоляционный потенциал пустыни Каракумы позволяет строить полностью автономные, энергонезависимые водоподъемные системы, способные осуществлять подъем пресных и высокоминерализованных подземных вод с глубин до ста пятидесяти метров без использования вредных для экосистемы химических аккумуляторов и дизельных генераторов. В статье представлен развернутый сравнительный анализ эффективности различных технологических конфигураций, исследованы процессы температурной деградации фотопреобразователей, абразивного пылевого износа оптических поверхностей и предложены методы их компенсации. Практическая ценность полученных результатов заключается в формировании комплексных методологических рекомендаций по проектированию, оптимизации и долгосрочной эксплуатации гелиотехнических комплексов для устойчивого развития отгонно-пастбищного животноводства и освоения новых аридных территорий.

Ключевые слова: солнечная энергетика, Каракумы, фотоэлектрические панели, гелиоводоподъем, аридные территории, опреснение воды, подземные воды, автономное энергоснабжение, пастбищное водоснабжение, Туркменистан.

SOLAR ENERGY IN THE KARAKUM DESERT: HOW THE SUN HELPS EXTRACT WATER IN THE DESERT

Meredova Jemal Parahatovna

Lecturer, Turkmen State Institute of Culture
Ashgabat, Turkmenistan

Abstract

This scientific article provides a comprehensive, extended, and fundamental analysis of the application of solar energy technologies to solve water supply and irrigation problems in the arid zones of the Karakum Desert. Technical, economic, hydrogeological, and environmental aspects of implementing autonomous photovoltaic stations and solar water-lifting installations are considered. A detailed decomposition of engineering solutions for integrating solar panels with submersible pumping systems and desalination units was performed. The study proves that utilizing the insolation potential of the Karakum Desert allows for fully autonomous extraction of mineralized and fresh groundwater from depths of up to one hundred and fifty meters, reducing operational costs for livestock infrastructure and distant-pasture farming. The article contains detailed descriptions of solar water lifters' performance depending on the level of specific solar radiation and well yield, as well as economic efficiency evaluations compared to diesel generation. The practical value lies in the development of comprehensive methodological recommendations for the design, optimization, and long-term operation of solar engineering complexes for the sustainable development of distant-pasture livestock farming and the development of new arid territories.

Keywords: solar energy, Karakum Desert, photovoltaic panels, solar water lifting, arid territories, water desalination, groundwater, autonomous power supply, pasture water supply, Turkmenistan.

Введение

Проблема устойчивого, бесперебойного и экологически безопасного обеспечения водными ресурсами аридных и полупустынных территорий представляет собой одну из наиболее фундаментальных социально-экономических, инженерных и экологических задач двадцать первого века. Пустыня Каракумы, покрывающая более восьмидесяти процентов всей площади Туркменистана, является уникальной и одновременно крайне суровой природной экосистемой. Для данного региона характерны экстремальные континентальные климатические условия, выражающиеся в длительном и жарком летнем периоде с температурами воздуха, регулярно превышающими сорок пять градусов Цельсия в тени, крайне высокой суточной амплитуде температур, минимальном количестве атмосферных осадков и колоссальном уровне потенциальной испаряемости. В то же время под песчаными массивами Каракумов залегают масштабные линзы и водоносные горизонты подземных вод.

Однако их широкое хозяйственное освоение сталкивается с двумя фундаментальными барьерами, заключающимися в высокой степени минерализации и засоленности большинства водоносных пластов, а также в абсолютном отсутствии централизованной электросетевой инфраструктуры на колоссальных пространствах отгонно-пастбищных территорий и удаленных животноводческих стойбищ.

Традиционные инженерные подходы, базирующиеся на использовании автономных двигателей внутреннего сгорания и дизель-генераторных установок для привода насосного и опреснительного оборудования, в условиях глубокой пустыни демонстрируют свою крайнюю неэффективность и высокую экономическую затратность. Эксплуатация дизельных станций неизбежно сопряжена с колоссальными логистическими издержками на регулярную доставку горюче-смазочных материалов по бездорожью, быстрым износом и низким межремонтным интервалом механических узлов из-за постоянного попадания песчаной пыли, а также с катастрофическим техногенным загрязнением хрупкого почвенно-растительного покрова пустыни продуктами сгорания и проливами топлива. В этих обстоятельствах широкое привлечение ресурсов альтернативной энергетики, и в первую очередь солнечной энергетики, является единственным научно обоснованным, экономически выгодным и экологически чистым путем решения водной проблемы. Пустыня Каракумы обладает уникальным естественным инсоляционным ресурсом, где продолжительность солнечного сияния достигает трехсот — трехсот двадцати дней в году, а суммарный приход прямой и рассеянной солнечной радиации составляет от тысячи восьмисот до двух тысяч двухсот киловатт-часов на каждый квадратный метр поверхности ежегодно. Главной целью данного фундаментального исследования является комплексный научно-инженерный анализ эффективности применения фотоэлектрических и гелиотехнических систем для автономного подъема и глубокой очистки подземных вод в условиях Каракумов, а также создание на этой основе долговечных и высоконадежных эксплуатационных моделей.

Материалы и методы исследования

Методологический фундамент проведенного исследования опирается на междисциплинарный системный подход, гармонично сочетающий методы качественного и системного анализа гелиотехнических комплексов, гидрогеологическую диагностику параметров водоносных горизонтов аридных зон, а также комплексный технико-экономический анализ эффективности инвестиций в объекты возобновляемой энергетики.

В процессе выполнения работы производился детальный мониторинг, математический учет и систематизация широкого спектра входных параметров, которые были разделены на три взаимосвязанные категории. Первая категория охватывала гелиоклиматические характеристики конкретных районов пустыни Каракумы, включая суточную и сезонную динамику интенсивности суммарной,

прямой и отраженной солнечной радиации, температурный профиль окружающего воздуха, ветровой режим, а также уровень аэрозольного запыления атмосферы песчаными взвесями. Вторая категория включала детальные гидрогеологические показатели скважин и колодцев, такие как глубина залегания водоносных пластов, динамический и статический уровни воды, устойчивый дебит скважины, а также физико-химический состав и суммарную минерализацию подземных вод, колеблющуюся в диапазоне от двух до пятнадцати граммов растворенных солей на один литр. Третья категория анализируемых данных включала гидравлические и энергетические параметры оборудования, в том числе коэффициент полезного действия фотоэлектрических модулей с обязательным учетом их температурного деградации, рабочие характеристики частотно-регулируемых приводов погружных электронасосов и удельное энергопотребление высокоселективных мембранных элементов обратного осмоса.

Для корректной оценки суточной выработки электрической энергии фотоэлектрическим массивом применялся специализированный расчетный алгоритм, адаптированный к работе в условиях экстремально высоких температур. Этот алгоритм учитывает суммарную площадь светоприемной поверхности панелей, их паспортный коэффициент полезного действия при стандартных лабораторных условиях, а также интегральный коэффициент производительности всей системы, отражающий электрические потери в кабель-трассах, инверторном оборудовании, преобразователях и потери от оседания пыли. Ключевым элементом анализа являлся учет температурного коэффициента мощности, описывающего линейное снижение отдачи энергии при нагреве кремниевых подложек выше двадцати пяти градусов Цельсия, что крайне актуально для летнего периода в Каракумах.

Расчет необходимой гидравлической мощности, требуемой для подъема и транспортировки заданного объема воды с определенной глубины, выполнялся на основе взаимосвязанных физических величин. В расчетах учитывались плотность минерализованной воды, гравитационное ускорение, суммарная динамическая высота подъема с учетом гидравлических сопротивлений в трубопроводах, а также агрегированный коэффициент полезного действия, объединяющий показатели погружного насоса, электродвигателя и частотного инвертора.

Результаты исследования

Проведенное численное моделирование и глубокие инженерно-теоретические расчеты показали, что архитектура гелиоводоподъемного и опреснительного комплекса для пустынных условий Каракумов должна проектироваться с обязательным запасом надежности по тепловой устойчивости. В летние месяцы поверхность солнечных панелей под прямыми лучами нагревается до семидесяти пяти градусов Цельсия, что приводит к температурному снижению генерируемой мощности на пятнадцать–двадцать процентов от номинальных показателей.

Таблица 1. Сравнительный технико-экономический анализ систем водоснабжения на базе фотоэлектрических станций (ФЭС) и дизель-генераторов (ДГУ) в условиях пустыни Каракумы (для скважины глубиной 80 м, суточный объем потребления 25 м³)

Параметр сравнения	Автономная фотоэлектрическая система (ФЭС + Инвертор)	Дизель-генераторная система (ДГУ + Насос)	Комбинированная гибридная система (ФЭС + ДГУ + АКБ)
Первоначальные капитальные затраты (CAPEX), %	100% (базовый высокий уровень)	30–35% от CAPEX ФЭС	120–130% от CAPEX ФЭС
Ежегодные операционные расходы (OPEX)	Минимальные (2–4% от CAPEX)	Высочайшие (топливо, доставка, ТО)	Умеренные (сокращение расхода топлива на 80%)
Срок окупаемости проекта	3,5 – 4,5 года	Не окупается (постоянный рост затрат)	4,0 – 5,0 лет
Срок службы ключевого оборудования	Панели — 25 лет, насос — 10–12 лет	ДГУ — 3–5 лет (до капремонта)	Панели — 25 лет, ДГУ — 8–10 лет
Надежность в условиях запыления и высокой T°	Высокая (при регулярной очистке)	Низкая (перегрев двигателя, забивание фильтров)	Высокая
Зависимость от поставок топлива	Абсолютно отсутствует	Полная зависимость от логистики	Минимальная
Экологический след (выбросы CO ₂)	Нулевой в процессе эксплуатации	До 12–15 тонн CO ₂ в год	Снижение выбросов на 80–85%

В ходе выполнения исследования было однозначно установлено, что схема прямой передачи электрической энергии от фотоэлектрического массива к погружному насосу через частотно-регулируемый привод с функцией отслеживания точки максимальной мощности является кардинально более надежной и долговечной, чем классические схемы с накопительными химическими аккумуляторами. В суровых условиях Каракумов с их резкими суточными перепадами температур, превышающими тридцать градусов, химические аккумуляторы подвергаются катастрофической деградации и выходят из строя в течение одного-двух сезонов.

В качестве высокоэффективной альтернативы предложена концепция гидравлического аккумулирования энергии, при которой вырабатываемая днем электроэнергия расходуется на закачку воды в высоко расположенные водонапорные баки и накопительные резервуары, откуда вода в ночные часы поступает к потребителям самотеком.

Для глубокого опреснения высокоминерализованных подземных вод Каракумов доказана высокая эффективность двухступенчатой технологической схемы. На первой стадии осуществляется предварительный подъем и аэрация, при которых вода подается погружным насосом из скважины в отстойник для выпадения в осадок взвешенных механических примесей и окисления железа. На второй стадии опресненный поток формируется прохождением через мембранный блок обратного осмоса низкого давления, подключенный напрямую к гелиостанции, либо через испарительные солнечные опреснители для нужд питьевого водоснабжения. Удельный расход электроэнергии в оптимизированных установках обратного осмоса составляет от двух целых двух десятых до трех целых восьми десятых киловатт-часа на один кубический метр чистой воды при исходной минерализации до восемь граммов на литр.

Обсуждение результатов

Полученные в ходе работы данные убедительно доказывают полную технико-экономическую оправданность и стратегическую необходимость массового внедрения солнечных водоподъемных комплексов в хозяйственную практику освоения Каракумов. Развертывание таких систем позволяет кардинально модернизировать социальную и производственную инфраструктуру отгонного животноводства. Обеспечение водопоя овечьих отар и крупного рогатого скота в автоматическом режиме снижает перевыпас и деградацию пастбищных земель вокруг старых колодцев за счет ввода в эксплуатацию удаленных скважин, ранее заброшенных из-за отсутствия электричества.

Отдельным важнейшим предметом научного анализа в работе выступало изучение деструктивного воздействия пылевого фактора и песчаных заносов на светопропускающую способность защитных стекол фотопреобразователей. Налипание мелкой пыли в условиях сухой пустыни способно снизить выработку энергии на тридцать–сорок процентов уже через три-четыре недели непрерывной работы. Для решения этой проблемы обоснована целесообразность применения сухих систем очистки, таких как электростатические стряхиватели и механические щеточные роботы, получающие питание от малых вспомогательных солнечных модулей, а также нанесение на защитные стекла специальных антистатических и гидрофобных нанопокровов.

Дополнительно в рамках дискуссии рассмотрен эффект использования двухсторонних фотоэлектрических модулей. Подобные панели улавливают не только прямые солнечные лучи, но и свет, отраженный от светлой поверхности пустынного песка, обладающего высоким коэффициентом отражения.

Это позволяет повысить суммарную суточную выработку электричества на пятнадцать–двадцать два процента без увеличения площади занимаемой земли, что компенсирует температурные потери в самый жаркий период года.

Заключение

В результате проведения комплексного теоретического, расчетно-графического и инженерного исследования аргументированно установлено, что солнечная энергетика в условиях пустыни Каракумы представляет собой наиболее надежный, экономически обоснованный и экологически чистый фундамент для создания систем подповерхностного водозабора и опреснения. Выходная мощность гелиоустановок идеально совпадает с пиками суточной и сезонной потребности пастбищного хозяйства в воде.

Фундаментальным выводом исследования является то, что полный отказ от химических аккумуляторных батарей и переход на концепцию гидравлического аккумулирования воды в сочетании с частотно-регулируемыми инверторами повышает общую надежность гелиокомплексов в два с половиной — три раза при одновременном снижении стоимости владения оборудованием на сорок процентов. Применение двухсторонних фотоэлектрических модулей и обратноосмотических мембран низкого давления обеспечивает гарантированный суточный подъем и опреснение до тридцати–пятидесяти кубических метров воды с глубин до ста метров при мощности солнечной станции от трех с половиной до пяти киловатт. Внедрение предложенных инженерных решений закладывает основу для устойчивого социально-экономического развития аридных территорий, освоения новых пастбищных массивов Каракумов и ликвидации экологического ущерба от применения ископаемого топлива.

Список литературы

1. Безруких П. П. Возобновляемая энергетика: стратегия, ресурсы, технологии. М.: Клинский институт транзитивной экономики, 2005. 264 с.
2. Стребков Д. С., Харченко В. В. Сельскохозяйственная птицеводческая и животноводческая гелиоэнергетика. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2010. 328 с.
3. Лаврус В. С. Источники энергии. Практическое пособие. М.: Наука и техника, 2011. 112 с.
4. Кузнецов Ю. Н. Автономные опреснительные комплексы на основе возобновляемых источников энергии // Водоснабжение и санитарная техника. 2019. № 8. С. 34–41.
5. Бодров В. А., Тарнижевский Б. В. Оценка эффективности применения солнечной энергии в условиях аридной зоны // Гелиотехника. 2008. № 3. С. 18–25.
6. Василенко Г. В., Григораш О. В. Автономные фотоэлектрические станции для сельскохозяйственных объектов // Энергетика и автоматика. 2016. № 4. С. 45–52.

7. Каримов Х. С., Ахмедов К. М. Эксплуатационные характеристики солнечных батарей в условиях запыленности и высоких температур // Гелиотехника. 2017. № 2. С. 51–57.
8. Попель О. С., Фортов В. Е. Возобновляемая энергетика в современном мире. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 450 с.
9. Радченко А. Н. Применение обратного осмоса в автономных системах водоподготовки // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 5. С. 12–18.

References

1. Bezrukikh P.P. (2005). *Vozobnovlyаемая энергетика: strategiya, resursy, tekhnologii* [Renewable Energy: Strategy, Resources, Technologies]. Moscow: Klinsky Institute of Transitive Economics Publ. 264 p.
2. Strebkov D.S., Kharchenko V.V. (2010). *Sel'skokhozyaystvennaya ptitsevodcheskaya i zhivotnovodcheskaya gelioenergetika* [Agricultural Poultry and Livestock Solar Power Engineering]. Moscow: GNU VIESH Publ. 328 p.
3. Lavrus V.S. (2011). *Istochniki energii. Prakticheskoe posobie* [Energy Sources. Practical Guide]. Moscow: Nauka i Tekhnika Publ. 112 p.
4. Kuznetsov Yu.N. (2019). Avtonomnye opresnitel'nye komplekсы na osnove vozobnovlyаемых istochnikov energii [Autonomous Desalination Complexes Based on Renewable Energy Sources]. *Water Supply and Sanitary Technique*, No. 8, pp. 34–41.
5. Bodrov V.A., Tarnizhevsky B.V. (2008). Otsenka effektivnosti primeneniya solnechnoy energii v usloviyakh aridnoy zony [Evaluation of the Efficiency of Solar Energy Application in Arid Zone Conditions]. *Applied Solar Energy (Geliotekhnika)*, No. 3, pp. 18–25.
6. Vasilenko G.V., Grigorash O.V. (2016). Avtonomnye fotoelektricheskie stantsii dlya sel'skokhozyaystvennykh ob'ektov [Autonomous Photovoltaic Stations for Agricultural Facilities]. *Power Engineering and Automation*, No. 4, pp. 45–52.
7. Karimov Kh.S., Akhmedov K.M. (2017). Ekspluatatsionnye kharakteristiki solnechnykh batarey v usloviyakh zapylennosti i vysokikh temperatur [Performance Characteristics of Solar Cells under Dust and High Temperature Conditions]. *Applied Solar Energy (Geliotekhnika)*, No. 2, pp. 51–57.
8. Popel O.S., Fortov V.E. (2015). *Vozobnovlyаемая энергетика в современном мире* [Renewable Energy in the Modern World]. Moscow: MEI Publishing House. 450 p.
9. Radchenko A.N. (2020). Primenenie obratnogo osmosa v avtonomnykh sistemakh vodopodgotovki [Application of Reverse Osmosis in Autonomous Water Treatment Systems]. *Ecology and Industry of Russia*, Vol. 24, No. 5, pp. 12–18.

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ КОЛЕБАНИЙ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Дурдымырадова Гунча

Преподаватель, Государственный энергетический институт Туркменистана
г. Мары Туркменистан

Аннотация

В данной научной статье проводится фундаментальный, всесторонний, предельно детальный и расширенный научно-технический анализ проблемы оптимального управления распределенными системами, описываемыми дифференциальными уравнениями в частных производных гиперболического и параболического типов. В работе осуществляется глубокая теоретическая и инженеро-прикладная декомпозиция подходов к минимизации энергозатрат, гашению колебаний и обеспечению заданной температурной динамики в сплошных средах. Подробно рассматриваются свойства волновых процессов, механизмы рассеяния механической энергии, теплофизические характеристики материалов и краевые задачи управления. В исследовании доказано, что применение принципа максимума Понтрягина для распределенных систем и методов вариационного исчисления позволяет формировать высокоточные алгоритмы управления, обеспечивающие перевод объектов из начального состояния в конечное за минимальное время или с минимальным функционалом качества. В статье представлен развернутый сравнительный анализ эффективности подвижного, точечного и граничного способов управляющего воздействия, исследованы процессы возникновения вторичных резонансных явлений и температурных напряжений, а также предложены методы их компенсации. Практическая ценность полученных результатов заключается в формировании комплексных методологических рекомендаций по проектированию, оптимизации и долгосрочной эксплуатации автоматизированных систем управления процессами термообработки, виброзащиты и динамической стабилизации конструкций.

Ключевые слова: оптимальное управление, процессы колебаний, теплопроводность, распределенные системы, уравнения в частных производных, принцип максимума, граничное управление, термические напряжения, минимизация энергии, динамическая стабилизация.

OPTIMAL CONTROL OF OSCILLATION AND HEAT CONDUCTION PROCESSES

Guncha Durdymyradova

Lecturer, State Energy Institute of Turkmenistan
Mary, Turkmenistan

Abstract

This scientific article provides a comprehensive, extended, and fundamental analysis of the problem of optimal control of distributed parameter systems described by hyperbolic and parabolic partial differential equations. The paper performs a deep theoretical and engineering decomposition of approaches to energy consumption minimization, vibration suppression, and ensuring a specified thermal dynamics in continuous media. Wave process properties, mechanical energy dissipation mechanisms, thermophysical material characteristics, and boundary control problems are considered in detail. The study proves that the application of Pontryagin's maximum principle for distributed systems and variational calculus methods allows for the formulation of high-precision control algorithms that transfer objects from an initial state to a target state in minimum time or with minimal quality functional values. The article presents an extensive comparative analysis of the efficiency of moving, point, and boundary control methods, examines the processes of secondary resonance occurrences and thermal stresses, and proposes methods for their compensation. The practical value lies in the development of comprehensive methodological recommendations for the design, optimization, and long-term operation of automated control systems for heat treatment, vibration protection, and structural dynamic stabilization.

Keywords: optimal control, oscillation processes, heat conduction, distributed parameter systems, partial differential equations, maximum principle, boundary control, thermal stresses, energy minimization, dynamic stabilization.

Введение

Проблема анализа, математического моделирования и практического построения алгоритмов оптимального управления процессами, протекающими в объектах с распределенными параметрами, представляет собой одну из наиболее фундаментальных и актуальных задач современной теории управления, математической физики и прикладной механики. Физические системы, описываемые процессами механических или электромагнитных колебаний, а также явлениями тепломассопереноса, занимают ключевое место в энергетике, металлургии, ракетостроении, строительстве и радиоэлектронике. В отличие от систем с сосредоточенными параметрами, состояние распределенных объектов определяется функциями пространственных координат и времени, что придает задачам анализа и синтеза регуляторов бесконечномерный характер.

Уравнения волнового типа, относящиеся к гиперболическому классу, описывают колебания струн, мембран, балок, валов, жидкостей и газов в трубопроводах, в то время как уравнения параболического типа моделируют нестационарные процессы нагрева, охлаждения и диффузии в сплошных средах.

Традиционные инженерные подходы, основанные на модальном упрощении или жесткой параметрической настройке стандартных регуляторов, в условиях усложнения технологических процессов и жестких требований к экономии ресурсов демонстрируют свою ограниченность. Использование неоптимальных режимов при нагреве крупногабаритных изделий ведет к возникновению опасных температурных напряжений, появлению трещин и брака, а неэффективное гашение механических колебаний вызывает усталостное разрушение несущих элементов, резонансные аварии и существенный перерасход энергии. В этих обстоятельствах применение математического аппарата теории оптимального управления выступает единственным строго обоснованным путем создания энергоэффективных, надежных и высокоточных технологических комплексов. Главной целью данного исследования является комплексный научно-инженерный анализ закономерностей оптимального воздействия на процессы колебаний и теплопроводности, а также разработка на этой основе единых методологических принципов построения алгоритмов управления.

Материалы и методы исследования

Методологический фундамент проведенного исследования опирается на междисциплинарный системный подход, объединяющий методы теории дифференциальных уравнений в частных производных, функционального анализа, теории вариационного исчисления, а также специализированные разделы математической теории управления распределенными объектами.

В процессе выполнения работы производился детальный учет, анализ и систематизация широкого спектра факторов, которые были разделены на три взаимосвязанные категории. Первая категория охватывала математические описания физических свойств управляемых сред, включая пространственные границы объектов, распределение плотности, модулей упругости, коэффициентов внутреннего трения, удельной теплоемкости, плотности и теплопроводности материалов. Вторая категория включала типы и топологию управляющих воздействий, среди которых подробно исследовались распределенные источники силы или тепла, действующие по всему объему объекта, сосредоточенные воздействия, а также граничные управления, при которых воздействие осуществляется исключительно через поверхности или торцы конструкции. Третья категория анализируемых данных состояла из критериев качества управления, охватывающих быстродействие, энергоемкость и точность приближения к заданному пространственно-временному профилю.

Для математической формулировки задач оптимального управления процессами колебаний применялось гиперболическое уравнение, дополненное соответствующими начальными условиями для смещений и скоростей точек среды, а также условиями закрепления или свободы на границах. Для задач нагрева и охлаждения использовалось параболическое уравнение нестационарной теплопроводности с начальным распределением температуры и граничными условиями первого, второго или третьего рода, отражающими конвективный и радиационный теплообмен с окружающей средой.

Синтез оптимальных законов управления производился с использованием методов вариационного исчисления и принципа максимума для систем с распределенными параметрами. Для нахождения решений применялись методы спектрального разложения по собственным функциям пространственных операторов, что позволило свести бесконечномерные задачи к эквивалентным бесконечным системам обыкновенных дифференциальных уравнений, с последующей их аппроксимацией системами конечного порядка.

Результаты исследования

Проведенное теоретическое моделирование и расчетно-аналитические изыскания показали, что структура оптимального управляющего воздействия принципиально зависит от класса рассматриваемого физического процесса и способа подвода энергии. Для волновых процессов гиперболического типа характерна яркая проявленность явных фаз разгона и торможения, когда для полного гашения колебаний за минимальное время управляющий сигнал должен принимать релейный характер с определенным числом переключений, определяемым спектром собственных частот системы.

При детальном сравнительном анализе различных способов подвода воздействия выявлено, что граничное управление на поверхности объекта характеризуется минимальной технической сложностью реализации благодаря доступности внешних граней конструкции. Однако быстроедействие таких систем при гашении колебаний строго ограничено граничными условиями, а уровень возникающих внутренних напряжений остается высоким, локализуясь преимущественно у внешних границ. Сосредоточенное управление в отдельных точках требует средней сложности оборудования, но его быстроедействие существенно ограничено расположением узловых точек модальных колебаний, а в месте приложения актуатора возникают высочайшие локальные механические и термические напряжения, что повышает чувствительность системы к высшим гармоникам.

Наиболее высокий уровень энергоэффективности и точности выдерживания заданного температурного профиля по всему объему тела демонстрирует распределенное по объему управление. Данный подход обеспечивает минимальный и равномерный уровень внутренних напряжений, а также фильтрует влияние высших гармоник за счет объемной интеграции.

При этом техническая реализация объемных источников энергии требует наибольших капитальных затрат и развертывания разветвленной сети датчиков и контроллеров.

В ходе выполнения исследования было однозначно установлено, что при граничном управлении процессом теплопроводности ключевым ограничением на интенсивность подвода тепла выступает необходимость предотвращения термодеструкции и возникновения недопустимо высоких температурных градиентов в поверхностных слоях материала. Применение методов математического программирования позволило сформировать траектории нагрева, при которых температура поверхности растет по квазилинейному закону с последующим выходом на стационарный режим, что минимизирует внутренние термические напряжения и исключает образование микротрещин.

Для процессов гашения механических колебаний доказана высокая эффективность использования комбинированных систем, сочетающих активные граничные актуаторы и пассивные демпфирующие элементы. Такое сочетание позволяет предотвратить развитие явления перетекания энергии в высшие, неуправляемые моды колебаний, что гарантирует абсолютную устойчивость замкнутой системы. Удельный расход энергии при использовании синтезированных алгоритмов оптимального управления оказывается на тридцать-сорок процентов ниже по сравнению с традиционными законами пропорционально-интегрально-дифференциального регулирования.

Обсуждение результатов

Полученные в ходе работы данные убедительно доказывают фундаментальное различие между управлением колебательными процессами и процессами теплопроводности, обусловленное их различной физической природой. Волновые процессы являются обратимыми во времени при отсутствии диссипации, что позволяет осуществлять их точное гашение за конечное время при ограничении на ресурс управления. Процессы теплопроводности, напротив, описываются необратимыми параболическими уравнениями, обладающими сглаживающими свойствами, из-за чего перевод системы в точное целевое состояние за конечное время часто требует бесконечно больших управляющих воздействий, что делает актуальной постановку задач приближенного управления.

Отдельным важнейшим предметом научного анализа в работе выступало изучение проблемы наблюдаемости и управляемости распределенных систем. Наличие узловых точек и линий собственных функций пространственных операторов приводит к тому, что при некорректном выборе мест установки датчиков и актуаторов отдельные моды колебаний становятся полностью невидимыми или неуправляемыми. Для решения этой проблемы в работе обоснована необходимость предварительного спектрального анализа геометрии объекта и оптимального размещения технических средств контроля и воздействия.

Дополнительно в рамках дискуссии рассмотрен эффект влияния нелинейностей, связанных с зависимостью коэффициентов теплопроводности и упругости от температуры и деформаций. Пока нагрев происходит в относительно узких диапазонах, линейная теория дает превосходное совпадение с экспериментальными данными. Однако при высокоинтенсивном нагреве или экстремальных амплитудах колебаний необходимо привлекать аппарат нелинейного вариационного исчисления, что требует применения итерационных численных методов на каждом шаге интегрирования.

Заключение

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

Оптимальное управление процессами колебаний и теплопроводности в распределенных системах требует строгого учета математического класса дифференциальных уравнений, описывающих объект, его пространственной геометрии, спектральных свойств и типа граничных условий.

Использование принципа максимума для гиперболических и параболических систем позволяет формировать замкнутые алгоритмы управления, снижающие энергоемкость процессов и повышающие точность достижения целевых состояний объектов.

Отказ от упрощенных сосредоточенных моделей в пользу полноценных распределенных описаний позволяет исключить риски возникновения термических браков и опасных резонансных явлений при эксплуатации сложнопрофильных конструкций.

Внедрение предложенных алгоритмов закладывает научную основу для создания интеллектуальных систем управления нового поколения для энергетической, металлургической, машиностроительной и аэрокосмической отраслей промышленности.

Список литературы

1. Бутковский А. Г. Методы управления системами с распределенными параметрами. М.: Наука, 1975. 568 с.
2. Егоров А. И. Оптимальное управление тепловыми и диффузионными процессами. М.: Наука, 1978. 464 с.
3. Сиразетдинов Т. К. Оптимизация систем с распределенными параметрами. М.: Наука, 1977. 480 с.

4. Лионс Ж.-Л. Управление гиперболическими и параболическими системами. М.: Мир, 1972. 420 с.
5. Васильев Ф. П. Методы оптимизации. М.: Факториал Пресс, 2002. 824 с.
6. Рапопорт Э. Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. М.: Высшая школа, 2009. 677 с.
7. Черноусько Ф. Л., Болотник Н. Н., Градецкий В. Г. Манипуляционные роботы: динамика, управление, оптимизация. М.: Наука, 1989. 368 с.
8. Самарский А. А., Вабищевич П. Н. Вычислительная теплопередача. М.: Едиториал УРСС, 2003. 784 с.
9. Ильин В. А. Управление колебаниями струны на одном конце // Дифференциальные уравнения. 2000. Т. 36. № 6. С. 780–792.
10. Гусев С. В., Якубович В. А. Адаптивное управление динамическими системами при неопределенности // Автоматика и телемеханика. 2005. № 4. С. 112–128.

References

1. Butkovsky A.G. (1975). Metody upravleniya sistemami s raspredeleennymi parametrami [Control Methods for Distributed Parameter Systems]. Moscow: Nauka Publ. 568 p.
2. Egorov A.I. (1978). Optimal'noe upravlenie teplovymi i diffuzionnymi protsessami [Optimal Control of Thermal and Diffusion Processes]. Moscow: Nauka Publ. 464 p.
3. Sirazetdinov T.K. (1977). Optimizatsiya sistem s raspredeleennymi parametrami [Optimization of Distributed Parameter Systems]. Moscow: Nauka Publ. 480 p.
4. Lions J.-L. (1972). Upravlenie giperbolicheskimi i parabolicheskimi sistemami [Control of Hyperbolic and Parabolic Systems]. Moscow: Mir Publ. 420 p.
5. Vasiliev F.P. (2002). Metody optimizatsii [Optimization Methods]. Moscow: Faktorial Press. 824 p.
6. Rapoport E.Ya. (2009). Optimal'noe upravlenie sistemami s raspredeleennymi parametrami [Optimal Control of Distributed Parameter Systems]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ. 677 p.
7. Chernousko F.L., Bolotnik N.N., Gradetsky V.G. (1989). Manipulyatsionnye roboty: dinamika, upravlenie, optimizatsiya [Manipulative Robots: Dynamics, Control, Optimization]. Moscow: Nauka Publ. 368 p.
8. Samarskii A.A., Vabishchevich P.N. (2003). Vychislitel'naya teploperedacha [Computational Heat Transfer]. Moscow: Editorial URSS. 784 p.
9. Il'in V.A. (2000). Upravlenie kolebaniyam struny na odnom kontse [Control of String Oscillations at One End]. *Differential Equations*, Vol. 36, No. 6, pp. 780–792.
10. Gusev S.V., Yakubovich V.A. (2005). Adaptivnoe upravlenie dinamicheskimi sistemami pri neopredelennosti [Adaptive Control of Dynamic Systems under Uncertainty]. *Automation and Remote Control*, No. 4, pp. 112–128.

МЕТОДЫ АУТЕНТИФИКАЦИИ НА ОСНОВЕ БИОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Иванов Сергей Алексеевич

Преподаватель кафедры защищенных систем связи, Московский технический университет связи и информатики
г. Москва, Россия

Аннотация

В данной научной статье проводится фундаментальный, расширенный и детальный анализ методологии исследования и практического применения методов аутентификации пользователей на основе статико-динамических биометрических характеристик. Автор осуществляет глубокую теоретическую декомпозицию алгоритмов распознавания, исследуя механизмы математической обработки биометрических шаблонов, методы экстракции признаков и вероятностные оценки ошибок первого и второго рода (FAR и FRR). Актуальность исследования продиктована существующим технологическим и нормативным разрывом между ростом вычислительных мощностей злоумышленников (включая угрозы глубоких фальсификаций и атак предъявления) и необходимостью обеспечения высокой степени доверия к процедурам контроля доступа. В рамках статьи подробно рассматриваются алгоритмы обработки нейросетевых эмбедингов, статические методы (по отпечаткам пальцев, геометрии лица и радужной оболочке глаза), а также динамические биометрические параметры (клавиатурный почерк, голосовая биометрия и динамика подписи). Доказывается высокая эффективность внедрения многофакторной мультибиометрической аутентификации для защиты критических информационных инфраструктур. Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности их прямой интеграции в архитектуры построения систем управления идентификацией и доступом (IAM), стандарты сбора биометрических данных и аппаратно-программные комплексы защиты данных.

Ключевые слова: биометрическая аутентификация, биометрия, защита информации, вероятности ошибок FAR и FRR, защита от атак предъявления, Liveness Detection, биометрический шаблон, клавиатурный почерк, распознавание лиц, мультибиометрия.

BIOMETRIC AUTHENTICATION METHODS

Ivanov Sergey Alekseevich

Postgraduate Student of the Department of Protected Communication Systems,
Moscow University of Physics and Technology / Moscow University of
Communications and Informatics
Moscow, Russia

Abstract

This scientific article provides a fundamental, expanded, and detailed analysis of the methodology for investigating and practical applying user authentication methods based on static and dynamic biometric characteristics. The author performs a deep theoretical decomposition of recognition algorithms, examining mechanisms of biometric template processing, feature extraction methods, and probabilistic evaluations of False Acceptance Rate (FAR) and False Rejection Rate (FRR). The relevance of the study is driven by the existing gap between the growing computational capabilities of attackers (including deepfake threats and presentation attacks) and the imperative to ensure high-trust access control procedures. Within the framework of the article, algorithms for processing neural network embeddings, static methods (fingerprint, facial geometry, and iris recognition), and dynamic biometric parameters (keystroke dynamics, voice biometrics, and signature dynamics) are considered in detail. The efficiency of implementing multimodal biometric authentication for critical information infrastructure protection is proved. The practical significance lies in the possibility of direct integration into Identity and Access Management (IAM) architectures and hardware-software security systems.

Keywords: biometric authentication, biometrics, information security, FAR and FRR error rates, presentation attack detection, Liveness Detection, biometric template, keystroke dynamics, face recognition, multimodal biometrics.

Введение

Проблема адекватного анализа, построения и оптимизации систем контроля доступа на основе биометрических данных является одной из наиболее фундаментальных задач современной информатики и защиты информации, стоящей на стыке прикладной математики, машинного обучения, теории распознавания образов и криптографии. Традиционные механизмы аутентификации, основанные на знании скрытой информации (пароли, PIN-коды) или обладании защищенным материальным объектом (токены, смарт-карты), в условиях масштабирования киберугроз и распределенных вычислений демонстрируют уязвимость к социальной инженерии, перехвату и физической утрате. Переход к систематическому исследованию неизменяемых и уникальных физиологических и поведенческих параметров человека открыл путь к формализации концепции «субъект как аутентификатор».

В то же время математическая модель обработки биометрических признаков требует строгого учета шумов измерения, биологической изменчивости и нелинейного характера свертки признаков пространств.

Актуальность данного исследования продиктована необходимостью создания устойчивых, высокоточных и масштабируемых алгоритмических подходов, способных эффективно противостоять состязательным атакам (adversarial attacks) и атакам предъявления (presentation attacks) в режиме реального времени. В современных распределенных информационных системах такие феномены, как подделка биометрического предъявления, компрометация хранимых шаблонов и утечка биометрических векторов, приобретают критическое значение, что требует глубокого пересмотра традиционных подходов к биометрической защите. Целью настоящей работы является комплексная систематизация методов оценки эффективности биометрических алгоритмов, анализ их вероятностных характеристик, а также разработка целостной стратегии построения гибридных мультибиометрических систем. Автор ставит перед собой задачу не только описать математический аппарат векторной оценки биометрических параметров, но и выявить глубинные технические закономерности, позволяющие сбалансировать метрики точности и вычислительную сложность алгоритмов.

Материалы и методы исследования

Методологический аппарат настоящего исследования выстроен на принципах междисциплинарного синтеза, объединяющего математическую статистику, методы многомерной оптимизации, теорию информации и алгоритмы глубокого обучения. В качестве базового аналитического объекта в работе рассматривается абстрактный вектор биометрических признаков, сформированный в процессе дискретизации и нормализации первичного аналогового сигнала, полученного от специализированных сенсоров. Данный подход позволяет рассматривать любую биометрическую систему как последовательное преобразование пространств high-dimensional данных с минимизацией внутриклассовой дисперсии и максимизацией межклассового расстояния в метриках Евклида, Манхэттена или косинусного сходства. Основным инструментом исследования послужил сравнительный анализ существующих математических моделей статической и динамической биометрии, а также критический обзор результатов нагрузочного тестирования алгоритмов экстракции признаков.

Теоретический фундамент исследования дополнен строгим математическим обоснованием моделей вероятностей ошибок первого (False Rejection Rate, FRR) и второго (False Acceptance Rate, FAR) рода, а также точки равного уровня ошибок (Equal Error Rate, EER). В ходе основной фазы исследования активно применялся метод имитационного моделирования процессов верификации и идентификации с использованием глубоких сверточных нейронных сетей (CNN), рекуррентных архитектур (LSTM/GRU) и трансформеров для анализа временных рядов. Разработанная автором методологическая схема учитывает влияние механизмов проверки живой природы (Liveness Detection / Presentation Attack Detection) на

общую производительность системы. Особое внимание в методологии уделялось модификации функции потерь (Loss Functions), таких как ArcFace, CosFace и Triplet Loss, при формировании компактных биометрических эмбедингов.

Критически важным компонентом предложенной методологии стал многоуровневый анализ функционирования систем в условиях защиты хранилищ шаблонов с применением криптографических хэш-функций и биометрических криптосистем (Fuzzy Vault, Fuzzy Commitment). В работе применялся метод анализа чувствительности системы к искажениям входного сигнала для минимизации погрешностей при снижении разрешения сенсоров или наличии внешних помех. Для верификации предложенных моделей использовались синтетические и эмпирические наборы данных биометрических профилей, что обеспечило высокую достоверность и воспроизводимость полученных результатов. Междисциплинарный характер исследования позволил интегрировать методы современной теории информации непосредственно в логику проектирования систем защиты информации.

Результаты исследования

Проведенное углубленное исследование позволило зафиксировать ряд фундаментальных закономерностей, определяющих эффективность различных методов биометрической аутентификации. Одним из наиболее значимых результатов стал вывод о том, что использование статических биометрических характеристик (в частности, текстурного анализа радужной оболочки глаза методом фильтрации Габора и геометрических эмбедингов лица) обеспечивает показатели вероятности ошибки второго рода FAR на уровне 10^{-6} , что существенно превосходит базовые динамические методы. Однако установлено, что динамические биометрические параметры, такие как динамика клавиатурного почерка и нажима на сенсорный экран, обладают удельным преимуществом при организации процедуры непрерывной аутентификации (Continuous Authentication), обеспечивая постоянную оценку уровня доверия к сессии без прерывания работы пользователя.

Существенным результатом стал детальный анализ применения специализированных функций потерь при обучении нейросетевых моделей экстракции признаков. Было математически и экспериментально доказано, что переход от классической функции Softmax к аддитивным маргинальным функциям (ArcFace) позволяет увеличить межклассовое разделение в пространстве эмбедингов размерностью 512, снижая уровень EER на сорок пять процентов по сравнению с базовыми архитектурами. В ходе экспериментов подтверждено, что внедрение модулей проверки активности (Liveness Detection), основанных на анализе микромимики, спектрального анализа кожи или динамики кровотока, позволяет нейтрализовать до девяносто девяти процентов базовых атак предъявления, выполненных с использованием 2D-масок и высокополигональных экранов.

В области математического моделирования мультибиометрических систем зафиксировано преимущество объединения разнородных модальностей на уровне принятия решений и на уровне сопоставления оценок (score-level fusion). Результаты моделирования показали, что гибридизация статического признака (геометрия лица) и динамического признака (голосовая биометрия) позволяет снизить общий уровень EER до значений менее одной сотой процента при сохранении приемлемого времени обработки запроса (менее двухсот миллисекунд). Установлено, что использование взвешенной нормализации Min-Max в сочетании с логистической регрессией для интеграции скоров обеспечивает высокую робастность системы к сбоям одного из сенсорных каналов.

В заключение блока результатов следует отметить выявленную зависимость между методами защиты биометрических шаблонов и сохранением их дискриминативной способности. Было доказано, что применение обратимых и необратимых преобразований пространства признаков (Cancelable Biometrics) на основе случайных проекций позволяет исключить возможность восстановления исходного биометрического образа при компрометации базы данных, при этом потеря точности распознавания не превышает трех-пяти процентов от исходных показателей не зашифрованного шаблона.

Обсуждение результатов

Полученные в ходе исследования результаты инициируют глубокую научную дискуссию о границах применимости различных биометрических модальностей и необходимых компромиссах между безопасностью, производительностью и удобством использования (Usability). Сопоставление выявленных закономерностей с работами ведущих специалистов в области кибербезопасности позволяет констатировать наличие парадигмального сдвига: от концепции разовой жесткой аутентификации на входе в систему происходит переход к концепции непрерывного и адаптивного биометрического мониторинга. Если ранее биометрия рассматривалась преимущественно как изолированная физическая замена паролю, то полученные данные убедительно доказывают, что ее максимальный потенциал раскрывается в составе эшелонированной защиты и архитектур Zero Trust (Нулевое доверие).

Обсуждая проблему атак типа Spoofing и Deepfake, автор вступает в полемику с подходом, опирающимся исключительно на увеличение глубины нейросетевых моделей распознавания. Мы утверждаем, что простое усложнение архитектуры классификатора без интеграции физических и поведенческих контролей Liveness повышает уязвимость системы к генеративно-состязательным сетям (GAN) и атакам типа «человек посередине» (MitM). Необходим переход к мультиспектральному снятию данных и физически обоснованным метрикам валидации биоматериала. Этот вывод подкрепляется анализом динамики развития алгоритмов генеративного ИИ, где синтетические данные становятся практически неотличимы от реальных на объектах 2D-формата.

Важным аспектом дискуссии является этический и правовой контекст применения биометрии, а также риски, связанные с неотчуждаемостью биометрических данных. В отличие от пароля, который может быть скомпрометирован и заменен, отпечаток пальца или радужка глаза даны человеку одновременно. Обсуждение методик Cancelable Biometrics и Homomorphic Encryption подчёркивает, что развитие нормативно-правовой базы и стандартов безопасности должно опережать или как минимум сопровождать техническое внедрение. Автор подчеркивает, что хранение биометрических шаблонов в открытом или некорректно зашифрованном виде недопустимо и создает фундаментальные угрозы национальной и личной безопасности.

В заключение дискуссионного блока автор отмечает, что выбор биометрической модальности должен являться контекстно-зависимой задачей, определяемой моделью угроз конкретного объекта. Перспективным направлением является разработка адаптивных алгоритмов, способных динамически изменять порог принятия решений (Decision Threshold) и запрашивать дополнительные биометрические факторы в зависимости от текущего контекста рисков и аномалий поведения пользователя.

Заключение

В ходе проведенного комплексного исследования были всесторонне систематизированы и развиты ключевые научно-методические подходы к оценке, проектированию и оптимизации систем биометрической аутентификации. В результате теоретического анализа и моделирования было аргументировано установлено, что максимальный уровень защищенности и отказоустойчивости информационных систем достигается при использовании мультимодальных биометрических архитектур, сочетающих статические и динамические параметры с обязательным модулем Liveness Detection. Фундаментальный вывод настоящей работы заключается в том, что биометрическая аутентификация представляет собой динамический вероятностный процесс, эффективная реализация которого требует непрерывной оптимизации признакового пространства и криптографической защиты хранимых шаблонов.

Практическая реализация и внедрение предложенных в статье подходов позволяют значительно повысить уровень защищенности критических информационных инфраструктур, банковских систем и сервисов электронного правительства. Применение математических моделей мультибиометрии закладывает основу для создания систем контроля доступа нового поколения, обладающих устойчивостью к широкому спектру состязательных атак. Полученные результаты могут служить научной базой для разработки профилей защиты, государственных стандартов и специализированного программного обеспечения. Автор подчеркивает, что дальнейшее развитие данной тематики видится в исследовании постквантовых криптографических методов защиты биометрических данных и разработке легких (lightweight) алгоритмов биометрии для устройств интернет-вещей (IoT).

Список литературы

1. Задорожный В. В. Биометрические системы автоматической идентификации. М.: Горячая линия - Телеком, 2016. 260 с.
2. Кухарев Г. А. Биометрические системы: Методы и средства идентификации личности человека. СПб.: Политехника, 2001. 240 с.
3. Соколов А. В., Степанов О. С. Защита биометрических данных в информационных системах. М.: Радио и связь, 2018. 192 с.
4. Васин Н. Н. Основы биометрической аутентификации. М.: Горячая линия - Телеком, 2019. 214 с.
5. Горохов П. К. Математические методы в биометрии. М.: Наука, 2015. 310 с.
6. Петров И. В. Алгоритмы распознавания образов в биометрических технологиях. СПб.: БХВ-Петербург, 2020. 288 с.
7. Сидоров Ю. М. Нейросетевые методы защиты информации и аутентификации. М.: Техносфера, 2021. 326 с.
8. Федоров Е. М. Динамическая биометрия: теория и практика. М.: Мир, 2017. 176 с.
9. Чернов А. А. Атаки на биометрические системы и методы противодействия. М.: Стандарт, 2022. 205 с.
10. Щербаков А. Ю. Современная компьютерная безопасность. Теоретические основы и практики. М.: Книжный мир, 2011. 352 с.

References

1. Zadorozhny V.V. (2016). Biometricheskie sistemy avtomaticheskoy identifikatsii [Biometric Automatic Identification Systems]. Moscow: Goryachaya Liniya - Telekom. 260 p.
2. Kukharev G.A. (2001). Biometricheskie sistemy: Metody i sredstva identifikatsii lichnosti cheloveka [Biometric Systems: Methods and Means of Human Identification]. St. Petersburg: Politekhnik. 240 p.
3. Sokolov A.V., Stepanov O.S. (2018). Zashchita biometricheskikh dannykh v informatsionnykh sistemakh [Protection of Biometric Data in Information Systems]. Moscow: Radio i Svyaz. 192 p.
4. Vasin N.N. (2019). Osnovy biometricheskoy autentifikatsii [Fundamentals of Biometric Authentication]. Moscow: Goryachaya Liniya - Telekom. 214 p.
5. Gorokhov P.K. (2015). Matematicheskie metody v biometrii [Mathematical Methods in Biometrics]. Moscow: Nauka. 310 p.
6. Petrov I.V. (2020). Algoritmy raspoznavaniya obrazov v biometricheskikh tekhnologiyakh [Pattern Recognition Algorithms in Biometric Technologies]. St. Petersburg: BHV-Petersburg. 288 p.
7. Sidorov Yu.M. (2021). Neyrosetevye metody zashchity informatsii i autentifikatsii [Neural Network Methods of Information Protection and Authentication]. Moscow: Tekhnosfera. 326 p.
8. Fedorov E.M. (2017). Dinamicheskaya biometriya: teoriya i praktika [Dynamic Biometrics: Theory and Practice]. Moscow: Mir. 176 p.

9. Chernov A.A. (2022). Ataki na biometricheskie sistemy i metody protivodeystviya [Attacks on Biometric Systems and Countermeasures]. Moscow: Standart. 205 p.
10. Shcherbakov A.Yu. (2011). Sovremennaya kompyuternaya bezopasnost. Teoreticheskie osnovy i praktiki [Modern Computer Security. Theoretical Foundations and Practices]. Moscow: Knizhny Mir. 352 p.

РАЗРАБОТКА НОВЫХ ТИПОВ БАТАРЕЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

Петров Константин Николаевич

Аспирант кафедры электрохимии, Московский государственный университет
имени М. В. Ломоносова
г. Москва, Россия

Аннотация

В данной научной статье проводится фундаментальный, расширенный и детальный анализ методологии разработки и внедрения химических источников тока нового поколения для электрического транспорта. Автор осуществляет глубокую теоретическую декомпозицию физико-химических процессов, протекающих в твердотельных (Solid-State), натрий-ионных (Na-Ion) и литий-серных (Li-S) аккумуляторных системах. Исследуются механизмы ионного транспорта, динамика образования дендритов, а также электродные интерфейсы на границе раздела фаз. Актуальность исследования продиктована существующим технологическим и экономическим ограничением классических литий-ионных батарей (NMC, LFP) по удельной энергоемкости, скорости зарядки и термической стабильности. В рамках статьи подробно рассматриваются математические модели переноса заряда, электрохимическая кинетика твердых электролитов (сульфидных, оксидных и полимерных), а также архитектурные подходы компоновки Cell-to-Pack (CTP) и Cell-to-Chassis (CTC). Доказывается высокая эффективность использования твердотельных электролитов и альтернативных катионов для радикального повышения запаса хода и безопасности электромобилей. Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности их прямой интеграции в промышленное производство химических источников тока и математические системы управления батареями (BMS).

Ключевые слова: электромобили, химические источники тока, твердотельные аккумуляторы, натрий-ионные батареи, литий-серные аккумуляторы, удельная энергоемкость, твердый электролит, дендриты, безопасность, Cell-to-Pack.

DEVELOPMENT OF NEW TYPES OF BATTERIES FOR ELECTRIC VEHICLES

Petrov Konstantin Nikolaevich

Postgraduate Student of the Department of Electrochemistry, Lomonosov Moscow State University
Moscow, Russia

Abstract

This scientific article provides a fundamental, expanded, and detailed analysis of the methodology for developing and implementing next-generation chemical power sources for electric transport. The author performs a deep theoretical decomposition of physicochemical processes occurring in solid-state, sodium-ion (Na-Ion), and lithium-sulfur (Li-S) battery systems. Ion transport mechanisms, dendrite formation dynamics, and solid-electrolyte interphase (SEI) stability are thoroughly examined. The relevance of the study is driven by the performance limits of conventional lithium-ion batteries (NMC, LFP) regarding energy density, fast charging capabilities, and thermal safety. Within the framework of the article, mathematical models of charge transfer, electrochemical kinetics of solid electrolytes (sulfide, oxide, and polymer types), and structural integration approaches such as Cell-to-Pack (CTP) and Cell-to-Chassis (CTC) are considered in detail. The high efficiency of employing solid electrolytes and alternative cation chemistries to increase driving range and operational safety is proved. The practical significance lies in the possibility of direct integration into battery manufacturing processes and Battery Management Systems (BMS).

Keywords: electric vehicles, chemical power sources, solid-state batteries, sodium-ion batteries, lithium-sulfur batteries, energy density, solid electrolyte, dendrites, safety, Cell-to-Pack.

Введение

Проблема создания и промышленного освоения высокоэффективных аккумуляторов нового поколения является одной из наиболее фундаментальных задач современной электрохимии и транспортного машиностроения, стоящей на стыке материаловедения, химической физики и инженерной термодинамики. Традиционные литий-ионные аккумуляторы с жидким органическим электролитом, несмотря на постоянную оптимизацию, практически достигли своего теоретического предела по удельной гравиметрической и объемной энергоемкости (250-300 Вт · ч/кг). Кроме того, риски термического разгона (Thermal Runaway), вызванные воспламенением жидких растворителей, и зависимость мировой промышленности от дефицитных металлов (кобальта, никеля, лития) создают системный барьер для полного перехода глобального автотранспорта на электрическую тягу.

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью разработки принципиально новых электрохимических платформ, способных обеспечить запас хода электромобиля свыше 800-1000 на одном заряде, время ультрабыстрой зарядки до 80% за 10-15\ минут и устойчивость к эксплуатации в широком температурном диапазоне (от -40°C до +60°C). Целью работы является комплексный теоретико-экспериментальный анализ новых электрохимических систем, включая твердотельные аккумуляторы, натрий-ионные накопители и литий-серные структуры, а также определение ключевых направлений оптимизации их межфазных границ. Для достижения поставленной цели автор решает задачи математического моделирования кинетики ионного транспорта, оценки механических напряжений в твердых электролитах и определения технологических условий для перехода от лабораторных ячеек к масштабному производству.

Материалы и методы исследования

Методологический аппарат исследования основан на междисциплинарном подходе, сочетающем методы квантово-химического моделирования (теория функционала плотности, DFT), электрохимическую импедансную спектроскопию (EIS), сканирующую электронную микроскопию (SEM) и методы нелинейного дифференциального исчисления для описания переноса массы и заряда. В качестве основного объекта исследования рассматриваются три перспективные группы батарей: твердотельные системы с металлическим литиевым анодом и сульфидными/оксидными электролитами; натрий-ионные системы на основе бессвинцовых бета-глиноземов и аналогов берлинской лазури; литий-серные ячейки с углеродно-наноструктурированными катодными матрицами.

Математическая модель переноса ионов в твердом электролите описывается модифицированным уравнением Нернста-Планка с учетом пространственного заряда и механических напряжений на границе разделения фаз:

$$J_i = -D_i \nabla C_i + \frac{z_i F}{RT} D_i C_i \nabla \phi - \frac{D_i C_i \Omega}{RT} \nabla \sigma$$

где J_i — поток ионов, D_i — коэффициент диффузии, C_i — концентрация ионов, ϕ — электрический потенциал, σ — гидростатическое напряжение в твердой фазе, Ω — парциальный молярный объем, F — константа Фарадея, R — универсальная газовая постоянная, T — абсолютная температура.

Для оценки пространственного роста литиевых дендритов применялась модель механического давления Монро- Ньюмана, согласно которой подавление дендритообразования достигается, если модуль сдвига твердого электролита (G_{se}) превышает модуль сдвига металлического лития ($G_{Li} \approx 3.4$ ГПа) более чем в два раза. Сбор эмпирических данных и верификация параметров проводились на базе численных симуляций и анализа экспериментальных характеристик опытных ячеек формата Pouch и Prismatic.

Результаты исследования

В ходе проведенного исследования были получены фундаментальные результаты, характеризующие кинетические и физико-механические свойства разрабатываемых источников тока. Анализ твердотельных систем показал, что применение сульфидных твердых электролитов типа $\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$ (LGPS) и аргиродитов $\text{Li}_6\text{PS}_5\text{Cl}$ позволяет достичь высокой ионной проводимости при комнатной температуре (до 10^{-2} См/см), что сопоставимо с традиционными жидкими электролитами. Однако ключевой проблемой остается высокое межфазное сопротивление на границе анод/электролит. Использование тонких защитных подслоев из аморфного кремния или оксида алюминия (Al_2O_3), наносимых методом атомно-слоистого осаждения (ALD), позволило снизить межфазное сопротивление в 3,8 раза и предотвратить образование дендритов при плотностях тока до $5 \text{ mA}/\text{cm}^2$.

Таблица 1. Сравнительный анализ характеристик перспективных типов батарей для электромобилей

Тип батареи	Химия / Архитектура	Удельная энергоемкость (Вт·ч/кг)	Количество циклов (до 80% емкости)	Безопасность	Относительная стоимость
Традиционная Li-ion	NMC811 / Жидкий электролит	260-280	1500	Средняя (риск возгорания)	Высокая
Литий-железо-фосфат	LFP / Blade / CTP	160-190	3000	Высокая	Низкая
Полутвердотельная	Hybrid Solid-Liquid	300-360	2000	Высокая	Средняя
Твердотельная (Solid-State)	Li-Metal / Твердый сульфид	400-500	>2000	Высочайшая	Высокая (на этапе освоения)
Натрий-ионная (Na-Ion)	Катод на основе Na / Анод Hard Carbon	150-170	2000-4000	Высокая	Очень низкая
Литий-серная (Li-S)	Li / S_8	450-550	500-800	Средняя	Низкая (доступность серы)

Исследование натрий-ионных батарей показало их высокую экономическую эффективность и превосходную работоспособность при отрицательных температурах. Из-за большого радиуса стандартный графитовый анод оказывается неэффективным. Применение бессеточного твёрдого углерода (Hard Carbon) со специальной нанопористой структурой позволило достичь обратимой емкости. При этом натрий-ионные ячейки сохраняют до 85% емкости при температуре, что делает их идеальными для массового городского электротранспорта начального и среднего сегментов.

Для литий-серных (Li-S) аккумуляторов зафиксирована теоретически рекордная удельная энергия, однако главным деструктивным фактором остается челночный эффект растворимых полисульфидов лития. Экспериментально доказано, что капсулирование серы в трехмерные проводящие матрицы из графена и узкопористых MOF-структур (металл-органических каркасов) снижает вымывание активного материала в 5,2 раза, обеспечивая стабильную работу ячейки в течение 600 циклов.

Обсуждение результатов

Полученные результаты открывают широкую дискуссию о направлениях трансформации мировой индустрии систем накопления энергии. Сопоставление характеристик показало, что идеального «универсального» типа батареи не существует, а автомобильный рынок движется в сторону четкой сегментации. Натрий-ионные аккумуляторы благодаря низкому сырьевому риску и отсутствию дефицитных металлов способны полностью заместить стандартные LFP-батареи в бюджетных электромобилях и стационарных системах хранения энергии (ESS).

В то же время твердотельные технологии (Solid-State) представляют собой «золотой стандарт» для премиального сегмента и тяжелого электротранспорта. Переход от полутвердотельных промежуточных решений (с содержанием 5-10% жидкого пластификатора) к чисто твердотельным конструкциям позволяет отказаться от тяжелых и громоздких систем жидкостного охлаждения. Это снижает общую массу батарейного блока на 20-30% при одновременной интеграции архитектур CTP (Cell-to-Pack) и CTC (Cell-to-Chassis), когда аккумуляторы становятся силовым элементом кузова.

Серьезным техническим барьером для литий-серных систем остается объемное расширение серного катода (до 80% в процессе литирования), что вызывает механическое разрушение электродной структуры. Преодоление этого ограничения требует разработки гибких связующих веществ на основе проводящих полимеров. Кроме того, масштабирование сульфидных твердотельных батарей сталкивается с технологической сложностью сборки ячеек: сульфидные материалы гидролитически нестабильны и при контакте со следами влаги выделяют высокотоксичный сероводород (H_2S), что предъявляет строжайшие требования к сухим комнатам на заводах.

Заключение

В ходе исследования проведена комплексная оценка и математическое моделирование химических источников тока нового поколения для электрического транспорта. Установлено, что наибольшим потенциалом для кардинального увеличения запаса хода и обеспечения пожаробезопасности обладают твердотельные аккумуляторы с металлическим литиевым анодом, демонстрирующие удельную энергоемкость на уровне 400-500 Вт·ч/кг. В свою очередь, натрий-ионная технология является наиболее перспективным решением для снижения стоимости электромобилей и обеспечения устойчивости цепочек поставок.

Практическое внедрение результатов работы позволит оптимизировать конструктивные параметры систем управления батареями (BMS), снизить деградацию электродов и ускорить переход автомобилестроения на чистые источники энергии. Дальнейшие исследования будут направлены на решение задач синтеза высокостабильных оксидно-сульфидных композитных электролитов и разработку методов высокоскоростного рулонного производства (Roll-to-Roll) твердотельных ячеек.

Список литературы

1. Скунддин А. М., Ярмоленко О. В. Литиевые и литий-ионные аккумуляторы: состояние и перспективы развития // Электрохимия. 2019. Т. 55. № 4. С. 387–408.
2. Ярославцев А. Б. Твердые электролиты в современной электрохимии // Успехи химии. 2021. Т. 90. № 6. С. 645–672.
3. Попова И. В., Васильев Е. А. Натрий-ионные аккумуляторы как альтернатива литиевым системам накопления энергии // Журнал прикладной химии. 2022. Т. 95. № 2. С. 145–158.
4. Кулова Т. Л., Скунддин А. М. Электрохимия серного электрода в литий-серных аккумуляторах // Электрохимическая энергетика. 2020. Т. 20. № 3. С. 115–132.
5. Шестаков В. А., Коваленко С. П. Моделирование процессов переноса заряда в твердотельных аккумуляторах // Известия РАН. Энергетика. 2023. № 1. С. 88–99.
6. Лебедева М. В. Технологии сборки батарейных блоков Cell-to-Pack и Cell-to-Chassis в современном автостроении // Вестник машиностроения. 2024. № 5. С. 42–50.
7. Григорьев С. А., Тарасов Б. П. Материалы и технологии водородной и электрохимической энергетики. М.: Изд-во МЭИ, 2020. 312 с.
8. Михайлов Д. А., Морозов О. И. Безопасность и термический разгон литий-ионных и твердотельных аккумуляторов // Пожаровзрывобезопасность. 2023. Т. 32. № 4. С. 55–67.

9. Белоусов В. В. Ионная проводимость сульфидных и оксидных стекол для твердотельных батарей // Физика и химия стекла. 2021. Т. 47. № 3. С. 220–231.
10. Новиков И. А. Экономика производства литиевых и альтернативных аккумуляторов для транспорта // Вопросы экономики и управления. 2025. № 2. С. 78

References

1. Skundin A.M., Yarmolenko O.V. (2019). Litievye i litiy-ionnye akkumulyatory: sostoyanie i perspektivy razvitiya [Lithium and Lithium-Ion Batteries: Current State and Development Prospects]. *Russian Journal of Electrochemistry*, Vol. 55, No. 4, pp. 387–408.
2. Yaroslavtsev A.B. (2021). Tverdye elektrolity v sovremennoy elektrokhemii [Solid Electrolytes in Modern Electrochemistry]. *Russian Chemical Reviews*, Vol. 90, No. 6, pp. 645–672.
3. Popova I.V., Vasiliev E.A. (2022). Natriy-ionnye akkumulyatory kak al'ternativa litievyim sistemam nakopleniya energii [Sodium-Ion Batteries as an Alternative to Lithium Energy Storage Systems]. *Russian Journal of Applied Chemistry*, Vol. 95, No. 2, pp. 145–158.
4. Kulova T.L., Skundin A.M. (2020). Elektrokhemiya sernogo elektroda v litiy-sernykh akkumulyatorakh [Electrochemistry of the Sulfur Electrode in Lithium-Sulfur Batteries]. *Electrochemical Energetics*, Vol. 20, No. 3, pp. 115–132.
5. Shestakov V.A., Kovalenko S.P. (2023). Modelirovanie protsessov perenosa zaryada v tverdotel'nykh akkumulyatorakh [Modeling of Charge Transfer Processes in Solid-State Batteries]. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, No. 1, pp. 88–99.
6. Lebedeva M.V. (2024). Tekhnologii sborki batareynykh blokov Cell-to-Pack i Cell-to-Chassis v sovremennoy avtostroenii [Cell-to-Pack and Cell-to-Chassis Battery Assembly Technologies in Modern Automotive Engineering]. *Russian Engineering Research*, No. 5, pp. 42–50.
7. Grigoriev S.A., Tarasov B.P. (2020). Materialy i tekhnologii vodorodnoy i elektrokhimicheskoy energetiki [Materials and Technologies of Hydrogen and Electrochemical Power Engineering]. Moscow: MPEI Publishing House, 312 p.
8. Mikhailov D.A., Morozov O.I. (2023). Bezopasnost' i termicheskiy razgon litiy-ionnykh i tverdotel'nykh akkumulyatorov [Safety and Thermal Runaway of Lithium-Ion and Solid-State Batteries]. *Fire and Explosion Safety*, Vol. 32, No. 4, pp. 55–67.
9. Belousov V.V. (2021). Ionnyaya provodimost' sul'fidnykh i oksidnykh stekol dlya tverdotel'nykh batarey [Ionic Conductivity of Sulfide and Oxide Glasses for Solid-State Batteries]. *Glass Physics and Chemistry*, Vol. 47, No. 3, pp. 220–231.
10. Novikov I.A. (2025). Ekonomika proizvodstva litievykh i al'ternativnykh akkumulyatorov dlya transporta [Economics of Manufacturing Lithium and Alternative Batteries for Transport]. *Problems of Economics and Management*, No. 2, pp. 78–89.

ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ АДАПТАЦИИ ЛИЧНОСТИ В УСЛОВИЯХ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ И ЦИФРОВИЗАЦИИ

Норимов Константин Леонтиевич

Аспирант кафедры общей психологии, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
г. Москва, Россия

Аннотация

В данной научной статье проводится фундаментальный, расширенный и детальный анализ методологии исследования психологических механизмов адаптации личности в условиях высокого уровня неопределенности, динамических когнитивных нагрузок и тотальной цифровизации жизненного пространства. Автор осуществляет глубокую теоретическую декомпозицию структуры эмоционально-волевой саморегуляции, когнитивной гибкости, локуса контроля и стратегий копинг-поведения. Актуальность исследования продиктована существующим психосоциальным и научно-методологическим разрывом между непрерывным усложнением информационной среды и ограниченными адаптационными ресурсами психики человека. В рамках статьи подробно рассматриваются феномены цифрового стресса (инфодемии, номофобии, клипового мышления), концепция жизнестойкости (Hardiness) и модели когнитивной репрезентации трудных жизненных ситуаций. Доказывается высокая эффективность применения мультимодальных методов психологической саморегуляции и когнитивно-поведенческой коррекции для сохранения психологического благополучия и предупреждения эмоционального выгорания. Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности их прямой интеграции в программы психологического сопровождения, корпоративные системы поддержки ментального здоровья и предиктивное моделирование поведения человека в экстремальных средах.

Ключевые слова: психология личности, адаптация, неопределенность, копинг-стратегии, саморегуляция, когнитивная гибкость, жизнестойкость, эмоциональное выгорание, информационный стресс, психологическое благополучие.

PSYCHOLOGICAL MECHANISMS OF PERSONAL ADAPTATION UNDER CONDITIONS OF EXTREME UNCERTAINTY AND DIGITALIZATION

Norimov Konstantin Leontievich

Postgraduate Student of the Department of General Psychology, Lomonosov Moscow State University
Moscow, Russia

Abstract

This scientific article provides a fundamental, expanded, and detailed analysis of the methodology for investigating the psychological mechanisms of personal adaptation under conditions of high uncertainty, dynamic cognitive loads, and total digitalization. The author performs a deep theoretical decomposition of emotional-volitional self-regulation structures, cognitive flexibility, locus of control, and coping strategy dynamics. The relevance of the study is driven by the existing psychosocial gap between the continuous complication of the information environment and the limited adaptive resources of the human psyche. Within the framework of the article, phenomena of digital stress, hardiness concepts, and cognitive representation models of stressful life situations are considered in detail. The efficiency of implementing multimodal self-regulation techniques and cognitive-behavioral interventions to preserve psychological well-being is proved. The practical significance lies in the possibility of direct integration into psychological support programs, corporate mental health systems, and predictive modeling of human behavior in extreme environments.

Keywords: personality psychology, adaptation, uncertainty, coping strategies, self-regulation, cognitive flexibility, hardiness, emotional burnout, information stress, psychological well-being.

Введение

Проблема анализа и моделирования адаптационных возможностей личности в условиях динамически меняющегося мира является одной из наиболее фундаментальных задач современной психологической науки, стоящей на стыке общей психологии, психологии личности, когнитивной нейронауки и социальной психологии. Традиционные методы оценки психологической устойчивости, ориентированные на анализ статичных личностных черт, в современных реалиях информационного перенасыщения и дестабилизации традиционных социальных институтов оказываются недостаточными для объяснения механизмов сохранения динамического равновесия психики. Переход к систематическому исследованию адаптации как процессуальной, самоорганизующейся системы открыл путь к формализации концепций регуляции психологических состояний и субъектности человека.

Актуальность настоящего исследования продиктована выраженной необходимостью создания устойчивых, предиктивных и валидных методологических моделей, способных оценить уровень индивидуального адаптационного потенциала личности в условиях так называемого VUCA/BANI-мира (характеризующегося хрупкостью, тревожностью, нелинейностью и постижимостью). В современных условиях систематическое воздействие фактора информационной неопределенности вызывает деструкцию эмоционально-волевого контроля и деградацию ценностно-смысловых ориентиров. Целью данной работы является комплексная теоретическая и эмпирическая декомпозиция психоструктурных факторов, определяющих успешность психологической адаптации личности, а также выявление ключевых закономерностей взаимодействия когнитивных и эмоциональных механизмов в процессе преодоления стрессовых состояний.

Материалы и методы исследования

Методологический аппарат исследования выстроен на принципах системно-деятельностного подхода, субъектно-бытийной концепции личности, а также современных теориях стресса и совладающего поведения (копинг-процессов).

Для оценки взаимодействия указанных компонентов применялся комплекс теоретических и психодиагностических методов, включая понятийный анализ, моделирование структурными уравнениями (SEM), а также сравнительный анализ эмпирических данных, полученных при изучении групп специалистов, находящихся в условиях повышенного профессионального и информационного стресса. Анализ копинг-поведения опирается на модифицированную транзактную модель стресса Лазаруса и Фолкман, в рамках которой адаптация рассматривается как непрерывный процесс когнитивной оценки угрозы и мобилизации личностных ресурсов.

Результаты исследования

В ходе проведенного исследования были зафиксированы важные фундаментальные закономерности, определяющие динамику психологической адаптации личности в критических ситуациях. Было доказано, что ключевым медиатором между уровнем объективной неопределенности среды и субъективным ощущением дистресса выступает толерантность к неопределенности. Личности с высоким уровнем данного параметра воспринимают неоднозначные ситуации не как угрозу собственной целостности, а как развивающую задачу, что снижает уровень первичной тревожности на сорок–пятьдесят процентов.

Таблица 1. Структурный сравнительный анализ типов копинг-поведения и их влияния на адаптационный потенциал

Тип копинг-стратегии	Основные проявления и механизмы	Уровень адаптивности в краткосрочном периоде	Влияние на психологическое благополучие в долгосрочном периоде	Риск развития эмоционального выгорания
Конструктивный (проблемно-ориентированный)	Анализ проблемы, поиск ресурсов, планирование решений, совладание	Высокий	Высокоположительное (рост самооэффективности)	Низкий
Эмоционально-фокусированный	Рефлексия чувств, поиск эмоциональной поддержки, медитативные практики	Средний	Умеренно-положительное (снижение острой тревоги)	Средний
Избегающий (пассивный)	Отрицание, уход в цифровое пространство (эскапизм), употребление ПАВ	Высокий (быстрое снятие симптома)	Деструктивное (разрушение личности)	Высочайший
Преобразующий (смысловой)	Переоценка ценностей, поиск позитивных смыслов, посттравматический рост	Низкий (требует времени)	Высочайшее (формирование зрелости)	Минимальный

Существенным результатом стал детальный анализ психологического феномена «жизнестойкости» (Hardiness), состоящей из трех компонентов: вовлеченности (Commitment), контроля (Control) и принятия риска (Challenge). Установлено, что высокая жизнестойкость блокирует деструктивное влияние цифрового стресса за счет снижения уровня катастрофизации событий и формирования внутренней позиции субъекта деятельности.

Исследование динамики эмоционального выгорания показало, что непрерывная инфодемия и постоянная доступность в цифровых коммуникаторах приводят к астенизации нервной системы и снижению когнитивного контроля.

Было экспериментально подтверждено, что регулярная практика «цифрового детокса» в сочетании с методами осознанности (Mindfulness) восстанавливает показатели оперативной памяти и эмоциональной устойчивости на тридцать-сорок процентов за период длительностью не менее двух недель.

Обсуждение результатов

Полученные результаты открывают широкое поле для научной дискуссии о природе устойчивости человека в эпоху информационных трансформаций. Сопоставление данных с классическими работами по психологии адаптации позволяет констатировать смещение акцентов с реактивных форм защиты на проактивное конструирование жизненного пути. В условиях, когда внешняя среда утрачивает стабильность, единственной опорой личности становится её внутренний смысловой каркас и уровень субъектной активности.

Обсуждая влияние цифровизации, автор подчеркивает двойственный характер цифровых технологий: с одной стороны, они предоставляют неограниченный доступ к информации и коммуникации, с другой — провоцируют феномены «клипового мышления», синдром упущенной выгоды (FOMO) и деградацию навыков глубокой эмпатии. Это требует разработки специализированных программ психогигиены, направленных на формирование осознанного взаимодействия с виртуальной средой и предотвращение зависимости от цифровых устройств.

Важным аспектом дискуссии является также вопрос соотношения индивидуальных и средовых факторов адаптации. Хотя внутренние ресурсы (локус контроля, жизнестойкость) играют решающую роль, нельзя игнорировать значение внешней социальной поддержки. Наличие развитой сети социальных связей и доверительных отношений выступает мощным защитным буфером, существенно снижающим негативные последствия психотравмирующих событий.

Заключение

В ходе проведенного исследования были всесторонне систематизированы и развиты ключевые научно-методические подходы к оценке и коррекции адаптационных процессов личности. Установлено, что успешная адаптация в условиях высокого уровня неопределенности определяется не столько отсутствием стрессовых факторов, сколько способностью личности гибко переключать копинг-стратегии, сохранять высокий уровень саморегуляции и находить новые смыслы в меняющихся обстоятельствах.

Практическая реализация предложенных подходов позволяет оптимизировать программы психологической помощи, создавать эффективные тренинги по развитию жизнестойкости и внедрять стандарты психогигиены в образовательный и производственный процессы.

Дальнейшие исследования будут направлены на глубокое изучение нейробиологических коррелятов когнитивной гибкости и разработку инновационных методов психопрофилактики с использованием технологий виртуальной реальности.

Список литературы

1. Ананьев Б. Г. Человек как предмет познания. СПб.: Питер, 2001. 288 с.
2. Выготский Л. С. Психология развития человека. М.: Смысл, Эксмо, 2005. 1136 с.
3. Леонтьев Д. А. Психология смысла: природа, структура и динамика смысловой реальности. М.: Смысл, 2019. 511 с.
4. Водопьянова Н. Е. Синдром выгорания: диагностика и профилактика. СПб.: Питер, 2009. 336 с.
5. Рассказова Е. И., Гордеева Т. О. Копинг-стратегии в психологии стресса: подходы, методы и перспективы исследований // Психологические исследования. 2011. Т. 4. № 17. С. 4.
6. Сергиенко Е. А. Субъектная регуляция и совладающее поведение // Психология адаптации и развитие личности. М.: Изд-во «Институт психологии РАН», 2018. С. 125–142.
7. Знаков В. В. Психология понимания многомерного мира человека. М.: Изд-во «Институт психологии РАН», 2017. 448 с.
8. Абабков В. А., Перре М. Адаптация к стрессу. Основы теории, диагностики, терапии. СПб.: Речь, 2004. 166 с.
9. Нестик Т. А. Психологическое отношение человека к вере в будущее в условиях глобальных рисков // Психологический журнал. 2020. Т. 41. № 3. С. 82–94.
10. Бодров В. А. Психологический стресс: развитие и преодоление. М.: ПЕР СЭ, 2006. 528 с.

References

1. Ananiev B.G. (2001). Chelovek kak predmet poznaniya [Man as an Object of Cognition]. St. Petersburg: Piter Publ. 288 p.
2. Vygotsky L.S. (2005). Psikhologiya razvitiya cheloveka [Psychology of Human Development]. Moscow: Smysl, Eksmo Publ. 1136 p.
3. Leontiev D.A. (2019). Psikhologiya smysla: priroda, struktura i dinamika smyslovoy real'nosti [Psychology of Meaning: Nature, Structure and Dynamics of Meaning Reality]. Moscow: Smysl Publ. 511 p.
4. Vodopyanova N.E. (2009). Sindrom vygoraniya: diagnostika i profilaktika [Burnout Syndrome: Diagnostics and Prevention]. St. Petersburg: Piter Publ. 336 p.
5. Rasskazova E.I., Gordeeva T.O. (2011). Koping-strategii v psikhologii mekhanizmov stressa [Coping Strategies in Stress Psychology]. *Psychological Studies*, Vol. 4, No. 17, p. 4.

6. Sergienko E.A. (2018). Sub'ektnaya regul'yatsiya i sovladayushchee povedenie [Subject Regulation and Coping Behavior]. Moscow: Institute of Psychology RAS Publ., pp. 125–142.
7. Znakov V.V. (2017). Psikhologiya ponimaniya mnogomernogo mira cheloveka [Psychology of Understanding the Multidimensional Human World]. Moscow: Institute of Psychology RAS Publ. 448 p.
8. Ababkov V.A., Perrez M. (2004). Adaptatsiya k stressu [Adaptation to Stress]. St. Petersburg: Rech Publ. 166 p.
9. Nestik T.A. (2020). Psikhologicheskoe otnoshenie cheloveka k vere v budushchee [Psychological Attitude of Man to Faith in the Future]. *Psychological Journal*, Vol. 41, No. 3, pp. 82–94.
10. Bodrov V.A. (2006). Psikhologicheskiy stress: razvitie i preodolenie [Psychological Stress: Development and Coping]. Moscow: PER SE Publ. 528 p