

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЖУРНАЛ ПРИКЛАДНЫХ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

№ 2 2026

Научный журнал

Журнал основан в 2007 году

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС 77-60735.

Электронная версия размещается на сайте <https://applied-research.ru>

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Стукова Наталия Юрьевна, к.м.н.

Технический редактор Доронкина Е.Н.

Корректоры: Галенкина Е.С., Дудкина Н.А.

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

Бизенкова Мария Николаевна, к.м.н.

Зав. редакцией Шнуровозова Т.В.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

д.б.н., проф. *Абдуллаев А.* (Душанбе); к.б.н. *Алиева К.Г.* (Махачкала); д.х.н., к.ф.-м.н., проф. *Алоев В.З.* (Чегем-2); д.б.н., проф. *Андреева А.В.* (Уфа); к.географ.н., доцент *Аничкина Н.В.* (Москва); к.ф.-м.н. *Барановский Н.В.* (Томск); д.б.н., доцент *Белых О.А.* (Иркутск); д.т.н., проф. *Бурмистрова О.Н.* (Ухта); д.т.н., доцент *Быстров В.А.* (Новокузнецк); д.м.н., проф. *Гарбуз И.Ф.* (Тирасполь); д.ф.-м.н., проф. *Геворкян Э.А.* (Москва); д.х.н., проф. *Гурбанов Г.Р.* (Баку); д.ветеринар.н., доцент *Ермолина С.А.* (Киров); к.т.н. *Есенаманова М.С.* (Атырау); к.ф.-м.н., д.п.н., проф. *Ефремова Н.Ф.* (Ростов-на-Дону); д.м.н. *Жураковский И.П.* (Новосибирск); д.т.н., доцент *Ибраев И.К.* (Темиртау); к.т.н., доцент *Исмаилов З.И.* (Баку); д.б.н., с.н.с. *Кавцевич Н.Н.* (Североморск); д.т.н., проф. *Калмыков И.А.* (Ставрополь); д.б.н. *Кокорева И.И.* (Алматы); д.г.-м.н., доцент *Копылов И.С.* (Пермь); к.б.н., доцент *Коротченко И.С.* (Красноярск); к.с.-х.н., доцент *Кряжева В.Л.* (Нижний Новгород); д.ф.-м.н., доцент *Кульков В.Г.* (Волжский); д.б.н. *Ларионов М.В.* (Балашов); д.б.н., к.с.-х.н., доцент *Леонтьев Д.Ф.* (Иркутск); д.географ.н., к.б.н., проф. *Луговской А.М.* (Москва); д.т.н., проф. *Несветаев Г.В.* (Ростов-на-Дону); д.с.-х.н. *Никитин С.Н.* (п. Тимирязевский); д.фарм.н., доцент *Олешко О.А.* (Пермь); д.с.-х.н., с.н.с., проф. *Партноев К.* (Душанбе); к.п.н., доцент *Попова И.Н.* (Москва); д.т.н., проф. *Рогачев А.Ф.* (Волгоград); д.м.н., с.н.с., доцент *Розыходжаева Г.А.* (Ташкент); д.г.-м.н. *Сакиев К.С.* (Бишкек); д.т.н., проф. *Сугак Е.В.* (Красноярск); д.ветеринар.н., проф. *Трефилов Б.Б.* (Санкт-Петербург); к.т.н., доцент *Хайдаров А.Г.* (Санкт-Петербург); д.м.н., проф. *Чарышкин А.Л.* (Санкт-Петербург); д.географ.н., проф. *Чодураев Т.М.* (Бишкек); д.б.н., проф. *Шалтыков К.Т.* (Бишкек); к.х.н. *Шарифуллина Л.Р.* (Москва); д.п.н., проф. *Щирин Д.В.* (Санкт-Петербург)

ISSN 1996-3955

Двухлетний импакт-фактор РИНЦ = 0,556

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ = 0,357

Периодичность	12 номеров в год		
Учредитель, издатель и редакция	ООО НИЦ «Академия Естествознания»		
Почтовый адрес	105037, г. Москва, а/я 47		
Адрес редакции и издателя	410056, г. Саратов, ул. им. Чапаева В.И., д. 56		
Типография	ООО «НИЦ Академия Естествознания» 410035, г. Саратов, ул. Мамонтовой, д. 5		
E-mail	edition@rae.ru	Телефон	+7 (499) 705-72-30
Подписано в печать	30.04.2026	Дата выхода номера	29.05.2026
Формат	60x90 1/8	Усл. печ. л.	6,25
Тираж	100 экз.	Заказ	МЖПиФИ 2026/2

Распространяется по свободной цене

© ООО НИЦ «Академия Естествознания»

INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED AND FUNDAMENTAL RESEARCH

№ 2 2026

Scientific journal

The journal is based in 2007

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Communications. **Certificate – PI No. FS 77-60735.**

The electronic version takes places on a site <https://applied-research.ru>

CHIEF EDITOR

Stukova Natalia Yurievna, Cand. Sci. (Medical)

Technical editor Doronkina E.N.

Correctors: Galenkina E.S., Dudkina N.A.

EXECUTIVE SECRETARY

Bizenkova Maria Nikolaevna, Cand. Sci. (Medical)

Head of the editorial board Shnurovozova T.V.

EDITORIAL BOARD

D.Sc., Prof. **Abdullaev A.** (Dushanbe); Cand.Sc. **Alieva K.G.** (Makhachkala); D.Sc., Cand.Sc., Prof. **Aloev V.Z.** (Chegem-2); D.Sc., Prof. **Andreeva A.V.** (Ufa); Cand.Sc., Docent **Anichkina N.V.** (Moscow); Cand.Sc. **Baranovsky N.V.** (Tomsk); D.Sc., Docent **Belykh O.A.** (Irkutsk); D.Sc., Prof. **Burmistrova O.N.** (Ukhta); D.Sc., Docent **Bystrov V.A.** (Novokuznetsk); D.Sc., Prof. **Garbuz I.F.** (Tiraspol); D.Sc., Prof. **Gevorkyan E.A.** (Moscow); D.Sc., Prof. **Gurbanov G.R.** (Baku); D.Sc., Docent **Ermolina S.A.** (Kirov); Cand.Sc. **Yesenamanova M.S.** (Atyrau); D.Sc., Cand.Sc., Prof. **Efremova N.F.** (Rostov-on-Don); D.Sc. **Zhurakovskiy I.P.** (Novosibirsk); D.Sc., Docent **Ibraev I.K.** (Temirtau); Cand.Sc., Docent **Ismailov Z.I.** (Baku); D.Sc. **Kavtsevich N.N.** (Severomorsk); D.Sc., Prof. **Kalmykov I.A.** (Stavropol); D.Sc. **Kokoreva I.I.** (Almaty); D.Sc., Docent **Kopylov I.S.** (Permian); Cand.Sc., Docent **Korotchenko I.S.** (Krasnoyarsk); Cand.Sc., Docent **Kryazheva V.L.** (Nizhny Novgorod); D.Sc., Docent **Kulkov V.G.** (Volzhsky); D.Sc. **Larionov M.V.** (Balashov); D.Sc., Cand.Sc., Docent **Leontiev D.F.** (Irkutsk); D.Sc., Cand. Sc., Prof. **Lugovskoy A.M.** (Moscow); D.Sc., Prof. **Nesvetaev G.V.** (Rostov-on-Don); D.Sc. **Nikitin S.N.** (p. Timiryazevsky); D.Sc., Docent **Oleshko O.A.** (Permian); D.Sc., Prof. **Partoev K.** (Dushanbe); Cand.Sc., Docent **Popova I.N.** (Moscow); D.Sc., Prof. **Rogachev A.F.** (Volgograd); D.Sc. Docent **Rozykhodzhaeva G.A.** (Tashkent); D.Sc. **Sakiev K.S.** (Bishkek); D.Sc., Prof. **Sugak E.V.** (Krasnoyarsk); D.Sc., Prof. **Trefilov B.B.** (Saint Petersburg); Cand.Sc., Docent **Khaidarov A.G.** (Saint Petersburg); D.Sc., Prof. **Charyshkin A.L.** (Saint Petersburg); D.Sc., Prof. **Choduraev T.M.** (Bishkek); D.Sc., Prof. **Shalpykov K.T.** (Bishkek); Cand.Sc. **Sharifullina L.R.** (Moscow); D.Sc., Prof. **Shchirin D.V.** (Saint Petersburg)

ISSN 1996-3955

Impact-factor RISQ (two-year) = 0,556

Impact-factor RISQ (five-year) = 0,357

Periodicity	12 issues per year		
Founder, publisher and editors	LLC PH Academy of Natural History		
Mailing address	105037, Moscow, p.o. box 47		
Editorial and publisher address	410056, Saratov, st. them. Chapaeva V.I., 56		
Printing house	LLC SPC Academy of Natural History 410035, Saratov, st. Mamontova, 5		
E-mail	edition@rae.ru	Telephone	+7 (499) 705-72-30
Signed for print	30.04.2026	Number issue date	27.05.2026
Format	60x90 1/8	Conditionally printed sheets	6,25
Circulation	100 copies	Order	МЖПиФИ 2026/2

Distribution at a free price

© LLC PH Academy of Natural History

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

СТАТЬЯ

МАСШТАБИРУЕМОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ IT-СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ
БЫСТРОГО РОСТА: АНАЛИЗ ФАКТОРОВ УСТОЙЧИВОСТИ

Жиделев Е. О. 5

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

СТАТЬИ

ОТДАЛЕННЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ РУДЫ
НА ЛЕЙКОЦИТЫ ПЕРИФЕРИЧЕСКОЙ КРОВИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

*Каюмова А. Ф., Габдулхакова И. Р., Зиякаева К. Р.,
Киселева О. С., Надыршина Д. Д., Фазлыяхметова М. Я.* 14

ВЛИЯНИЕ РАСТЕНИЙ-ФИТОМЕЛИОРАНТОВ И КОНСОРЦИУМА
СОЛЕУСТОЙЧИВЫХ БАКТЕРИЙ НА СОЛЕВОЙ РЕЖИМ ПОЧВ

Смирнова И. Э., Баймаханова Г. Б., Алдабергенов М. К., Рахметова Я. У. 20

МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ

СТАТЬЯ

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСА МАКРОФАГАЛЬНЫХ РЕАКЦИЙ,
УЧАСТВУЮЩИХ В КЛЕТОЧНОЙ МУЛЬТИНУКЛЕАЦИИ, ИНТЕГРАЦИИ,
ДИФФЕРЕНЦИРОВКЕ

Ильин Д. А. 26

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

СТАТЬИ

ПОИСК ПРОТОТИПА И КАСКАДНОЕ КОПИРОВАНИЕ
В РАДИОЧАСТОТНОМ РЕЕСТРЕ: ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ
И ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАПРОСОВ

Аданбаев А. М., Сагымбаев А. А. 32

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ СТОХАСТИЧЕСКОЙ ЭНТРОПИИ
В СИСТЕМЕ КЛЕТОЧНОГО АВТОМАТА 2D И 3D РАЗМЕРНОСТИ

Клеммер П. С., Рави Кумар, Шебанов В. В. 40

CONTENTS

TECHNICAL SCIENCES

ARTICLE

SCALABILITY OF DISTRIBUTED IT-SYSTEMS IN CONDITIONS
OF RAPID GROWTH: ANALYSIS OF STABILITY FACTORS

Zhidelev E. O. 5

BIOLOGICAL SCIENCES

ARTICLES

LONG-TERM EFFECTS OF ORE ON PERIPHERAL BLOOD
LEUKOCYTES IN EXPERIMENT

*Kayumova A. F., Gabdulkhakova I. R., Ziyakaeva K. R.,
Kiseleva O. S., Nadyrshina D. D., Fazlyakhmetova M. Ya.* 14

EFFECT OF PHYTO-MELIORANTS AND A CONSORTIUM
OF SALT-TOLERANT BACTERIA ON SOIL SALT REGIME

Smirnova I. E., Baymakhanova G. B., Aldabergenov M. K., Rakhmetova Ya. U. 20

MEDICAL SCIENCES

ARTICLE

INVESTIGATION OF THE COMPLEX OF MACROPHAGE
REACTIONS INVOLVED IN CELLULAR MULTINUCLEATION,
INTEGRATION, DIFFERENTIATION

Ilin D. A. 26

TECHNICAL SCIENCES

ARTICLES

PROTOTYPE SEARCH AND CASCADING COPY IN A RADIO
FREQUENCY REGISTER: PERFORMANCE AND QUERY
OPTIMISATION

Adanbaev A. M., Sagymbaev A. A. 32

STUDY OF THE BEHAVIOR OF STOCHASTIC ENTROPY
IN A 2D AND 3D CELLULAR AUTOMATON SYSTEM

Klemmer P. S., Ravi Kumar, Shebanov V. V. 40

СТАТЬЯ

УДК 004.42:004.738



CC BY 4.0

**МАСШТАБИРУЕМОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ
ИТ-СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ БЫСТРОГО РОСТА:
АНАЛИЗ ФАКТОРОВ УСТОЙЧИВОСТИ****Жиделев Е. О.***Независимый исследователь, Москва, Российская Федерация,
e-mail: evgeniy.zhidelev@gmail.com*

В современном цифровом ландшафте распределенные ИТ-системы занимают ключевую роль, обеспечивая взаимодействие множества вычислительных узлов для предоставления различных сервисов. С ростом спроса растет и нагрузка на эти системы, поэтому расширение их архитектуры становится жизненно важным. Цель статьи – провести анализ особенностей масштабируемости распределенных ИТ-систем в условиях быстрого роста с точки зрения обеспечения их устойчивости. В работе применены методы системного анализа, моделирования и формализации архитектурных решений в распределенных ИТ-системах. В процессе исследования описан переход от монолитных систем к динамичным, адаптивным инфраструктурам, подчеркивая стратегическую важность гибких, интеллектуальных вычислительных сред, способных реагировать на все более сложные технологические требования. В процессе исследования представлена авторская таксономия «устойчивость – задержка – согласованность», которая объединяет эти характеристики с механизмами масштабирования, формируя единую систему взаимных ограничений для анализа архитектурных решений в распределенных системах. Успех масштабируемых распределенных ИТ-систем зависит от разработки комплексных стратегий, которые обеспечивают баланс между технологическими инновациями и практическими эксплуатационными требованиями, создавая инфраструктуру, способные быстро реагировать на меняющиеся вычислительные потребности, и сохраняя при этом оптимальную производительность, безопасность и эффективность. На основе имитационного моделирования установлено, что предложенная таксономия снижает погрешность прогнозирования поведения инфраструктуры с 24,1 до 4,8 % в сравнении с традиционными реактивными и линейными методами управления. Количественно доказано, что учет вектора состояния обеспечивает сохранение устойчивости системы на уровне 0,65 даже при десятикратных пиковых нагрузках. Применение на практике предложенной таксономии позволит существенно повысить точность прогнозирования поведения распределенных ИТ-систем при масштабировании, минимизируя риски архитектурных ошибок за счет учета обратного влияния качественных метрик на пропускную способность системы.

Ключевые слова: распределенная система, масштабирование, география, надежность, задержка, устойчивость, согласованность

**SCALABILITY OF DISTRIBUTED IT-SYSTEMS
IN CONDITIONS OF RAPID GROWTH:
ANALYSIS OF STABILITY FACTORS****Zhidelev E. O.***Independent researcher, Moscow, Russian Federation,
e-mail: evgeniy.zhidelev@gmail.com*

In today's digital landscape, distributed IT systems play a key role, enabling multiple computing nodes to interact in order to provide various services. As demand grows, so does the load on these systems, making scalability vital. The purpose of this article is to analyse the scalability characteristics of distributed IT systems in conditions of rapid growth from the perspective of ensuring their stability. The work applies methods of system analysis, modelling, and formalisation of architectural solutions in distributed IT systems. The research describes the transition from monolithic systems to dynamic, adaptive infrastructures, emphasising the strategic importance of flexible, intelligent computing environments capable of responding to increasingly complex technological requirements. The study presents the author's taxonomy of 'resilience-delay-consistency' as a new structure for evaluating architectural solutions in distributed systems. Unlike existing methodologies, this approach integrates scaling mechanisms with stability, latency, and consistency parameters, combining them into a single system of mutual constraints. Thus, the success of scalable distributed IT systems depends on the development of comprehensive strategies that balance technological innovation and practical operational requirements, creating infrastructures that can respond quickly to changing computing needs while maintaining optimal performance, security, and efficiency. Based on simulation modelling, it has been established that the proposed taxonomy reduces the error in predicting infrastructure behaviour from 24.1 % to 4.8 % compared to traditional reactive and linear control methods. It has been quantitatively proven that taking into account the state vector ensures that the system remains stable at a level of 0.65 even under tenfold peak loads. The practical application of the proposed taxonomy will significantly improve the accuracy of infrastructure behaviour prediction during scaling, minimising the risks of architectural errors by taking into account the reverse impact of quality metrics on system throughput.

Keywords: distributed system, scaling, geography, reliability, latency, stability, consistency

Введение

Распределенные системы представляют собой фундаментальный сдвиг в парадигме современной вычислительной инфраструктуры, характеризующийся совместной работой нескольких сетевых компьютеров в качестве единого комплекса. В отличие от традиционных централизованных подходов, при которых обработка происходит на одном компьютере, распределенные архитектуры делят вычислительные задачи между независимыми узлами, каждый из которых имеет собственные вычислительные мощности и локальное хранилище [1]. Этот децентрализованный подход становится все более важным по мере расширения цифровых услуг для удовлетворения растущих потребностей пользователей на глобальных рынках. В результате системы, характеризующиеся своей распределенной природой, стали повсеместными в современных вычислительных средах, обеспечивая работу широкого спектра приложений [2].

Ландшафт разработки распределенных систем постоянно развивается под влиянием технологических достижений, меняющихся потребностей пользователей и новых цифровых технологий. В то же время необходимо отметить, что по мере расширения распределенности и роста нагрузки возрастает общая сложность таких архитектур. При этом постепенно усиливаются проблемы оптимизации производительности, поддержания согласованности данных и обеспечения устойчивой масштабируемости. Увеличение числа взаимодействующих узлов усложняет механизмы коммуникации, синхронизации и управления разделяемым состоянием, что формирует ряд системных ограничений [3]. К ключевым проблемам относятся:

1. Пределы горизонтального масштабирования, выражающиеся в снижении пропускной способности при добавлении новых узлов.

2. Рост межузловых задержек, обусловленный распределенностью вычислительных ресурсов и неоднородностью сетевой инфраструктуры.

3. Несистемная балансировка нагрузки, проявляющаяся в неравномерном распределении вычислительных и сетевых ресурсов между узлами.

4. Сложность координации распределенного состояния, требующая повышенных затрат на поддержание согласованности и корректности данных в условиях изменений.

Отмеченные факторы совокупно определяют границы функциональной устойчивости распределенной архитектуры. Для формализации данного влияния в табл. 1

представлены основные технические параметры, определяющие масштабируемость распределенных ИТ-систем, а также их характерное поведение в зависимости от уровня нагрузки.

С учетом вышеизложенного исследования в развивающейся области инженерии распределенных архитектур с отдельным акцентом на масштабируемость, которая становится краеугольным принципом проектирования современных систем, гарантирующим непрерывную производительность и быстродействие в условиях экспоненциального роста, являются научно и практически значимыми, что и предопределило выбор темы данной статьи.

Изучением новых тенденций, проблем и методологии в разработке распределенных систем с учетом необходимости управлять данными, синхронизировать процессы между узлами, смягчать последствия сетевой задержки и ограничений пропускной способности занимаются Jianan Chen, Istas Fahrurrazi Nusyirwan, Robiah Ahmad, Fadhilah Abdul Razak, Lili Jing [4], А. О. Батанов, А. С. Литвинова [5], И. Д. Котилевец, И. А. Иванова [6].

Над разработкой моделей для оценки показателей масштабируемости распределенных систем с определением ключевых индикаторов, таких как задержка и пропускная способность, трудятся Jinfeng Shi, Peng Wan [7], Mounira Hamdi, Samira Kamoun, Lhassane Idoumghar, Mondher Chaoui, Abdenaceur Kachouri [8], А. В. Иванов, И. А. Огнев, Ю. А. Попова [9].

Обсуждение архитектурных шаблонов и практических стратегий масштабирования корпоративных веб-систем, с учетом методов устранения узких мест как в программном обеспечении, так и в инфраструктуре, представлено публикациями И. А. Соколова [10], В. А. Зеленцова, В. А. Соболевского [11], Zhongzhe Hu, Ninghui Sun, Guangming Tan [12].

Признавая фундаментальную ценность существующих трудов, следует отметить, что некоторые вопросы в этой предметной области освещены недостаточно полно. Так, например, отдельного внимания заслуживает создание адаптивных механизмов управления масштабированием, способных на основе прогнозной аналитики векторов состояния превентивно реконфигурировать топологию системы для предотвращения каскадных отказов, выходя за рамки традиционных реактивных стратегий.

Цель исследования – провести анализ особенностей масштабируемости распределенных ИТ-систем в условиях быстрого роста с точки зрения обеспечения их устойчивости.

Материалы и методы исследования

В качестве материалов использованы научные публикации по проблемам масштабируемости и устойчивости распределенных систем, а также обобщенные технические метрики их функционирования. Методы исследования включают системный анализ архитектур распределенных систем, сравнительный анализ стратегий масштабирования и математическую формализацию ключевых показателей устойчивости, задержки и согласованности данных.

Результаты исследования и их обсуждение

Цифровая трансформация диктует отказ от жестких монолитных архитектур в пользу гибких распределенных моделей, способных к бесшовному масштабированию. Этот переход обеспечивает создание динамичных вычислительных сред, где ресурсы выделяются и перераспределяются с высокой точностью в зависимости от текущих задач, в отличие от традиционных подходов, ограниченных физическими возможностями оборудования. Фундаментальную роль здесь играют микросервисная архитектура и контейнеризация [13].

Ключевым фактором в условиях растущих технологических требований становится внедрение интеллектуальных механизмов управления. Современные инфраструктуры трансформируются из просто хранилищ данных в адаптивные системы, использующие алгоритмы машинного обучения для предиктивного анализа нагрузок и проактивного распределения ресурсов [14]. Такая интеллектуальная гибкость не только гарантирует высокую производительность и надежность, предотвращая сбои до их возникновения, но и приобретает стратегическое значение, позволяя оптимизировать операционные расходы и обеспечивать непрерывность процессов в условиях непредсказуемого роста данных [15].

Для формализации этих зависимостей и систематизации архитектурных вызовов в рамках исследования разработана авторская таксономия «устойчивость – задержка – согласованность», представляющая собой структурную основу для анализа архитектурных решений в распределенных системах (рисунок). Таксономия позволяет формально описывать архитектурные профили, определять границы масштабируемости и выявлять взаимные ограничения между ключевыми характеристиками.

Представленная на рисунке таксономия наглядно отражает взаимосвязь четырех групп элементов:

1. Механизмы масштабирования. В верхней части схемы отображены четыре распространенные стратегии увеличения вычислительных ресурсов: прогнозное масштабирование, реактивное масштабирование, масштабирование по событиям, скоординированное масштабирование. Каждый механизм снабжен характеристикой времени реакции и связан с соответствующим архитектурным профилем, который отражает его поведение в условиях изменения нагрузки.

2. Архитектурные профили. Профили, расположенные под каждым механизмом масштабирования, оцениваются по трем метрикам таксономии:

- устойчивость (U) – способность узлов продолжать работу при отказах и перегрузках;

- задержка (Z) – среднее время отклика пользователей и межузловых коммуникаций;

- согласованность (C) – степень синхронизации данных между распределенными узлами.

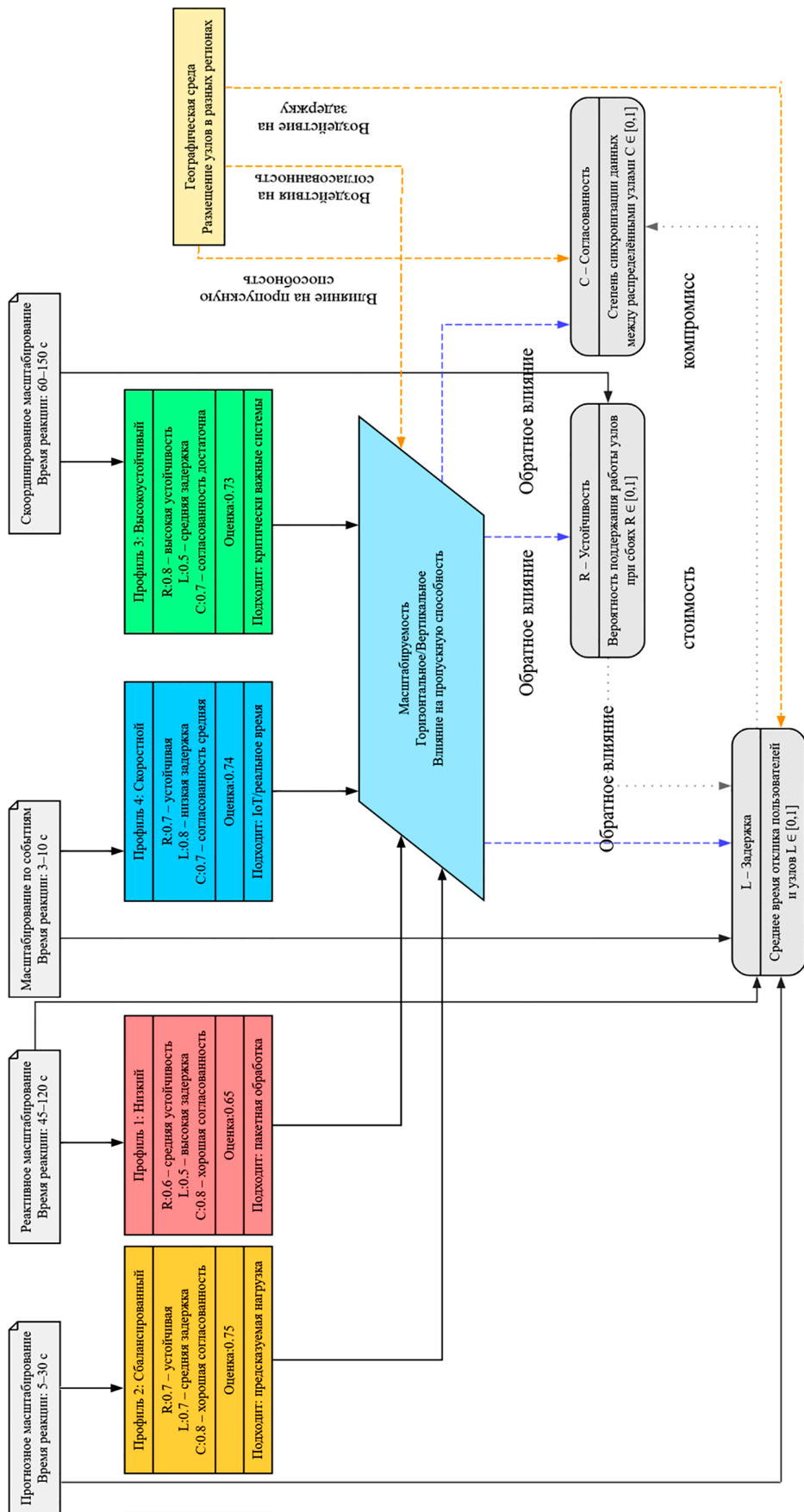
Каждый профиль обладает интегральной оценкой и целевым сценарием применения (реальное время, критические системы, пакетная обработка и др.).

3. Компонент масштабируемости. В центральной части схемы объединяются архитектурные профили в единую сущность «Масштабируемость», представляющую итоговый эффект: горизонтальное или вертикальное расширение ресурсов, изменение пропускной способности, воздействие на метрики U , Z , C . В этой зоне отражено обратное влияние, то есть взаимная зависимость, при которой масштабирование улучшает или ухудшает показатели U , Z , C , а динамика этих показателей, в свою очередь, ограничивает максимально возможную масштабируемость.

4. Географически распределенная среда. Правая часть рисунка показывает, как размещение узлов в разных регионах влияет на увеличение задержек, усложнение обеспечения согласованности, снижение общей пропускной способности. Эти факторы интегрированы в схему через стрелки влияния, поскольку именно географическая распределенность на сегодняшний день в большинстве случаев является ключевым ограничителем масштабируемости.

Рассмотрим более подробно математическую формализацию таксономии $U-Z-C$.

Пусть: $U \in [0,1]$ – устойчивость, $Z \in [0,1]$ – нормированная задержка (чем ниже задержка, тем выше значение), $S \in [0,1]$ – согласованность, λ – входящая нагрузка, M – масштабируемость системы.



Концептуальная схема оценки архитектурных решений
 на основе таксономии «устойчивость – задержка – согласованность»
 Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Интегральная оценка архитектурного профиля:

$$Q = \alpha U + \beta Z + \gamma S, \quad (1)$$

$$\alpha + \beta + \gamma = 1.$$

Формула (1) напрямую соотносится с блоком «Архитектурные профили» на схеме:

– весовые коэффициенты (α , β , γ): позволяют адаптировать модель под конкретные профили. Например, для «Профиля 4: Скоростной» приоритет отдается коэффициенту задержки (β), а для «Профиля 3: Высокоустойчивый» – устойчивости (α);

– метрики: U , Z , и S являются параметрами, по которым оценивается каждый из четырех представленных механизмов масштабирования.

Коэффициенты выбираются под специфику предметной области.

Масштабируемость при росте нагрузки:

$$M(k) = \frac{\text{пропускная способность при } k\lambda}{\text{пропускная способность при } \lambda} \quad (2)$$

где $k > 1$ – коэффициент увеличения нагрузки.

Ограничения масштабируемости в терминах U – Z – S :

$$M(k) \leq F(U, Z, S) \quad (3)$$

где

$$F(U, Z, S) = U \cdot (1 - Z^p) \cdot \Phi(S) \quad (4)$$

$$\Phi(S) = \begin{cases} S, & S \geq S_{кр} \\ \eta S, & S < S_{кр} \end{cases} \quad (5)$$

Эта модель математически описывает «обратное влияние», указанное на рисунке:

– прямая зависимость от U : рост масштабируемости линейно ограничен текущим уровнем устойчивости. Если вероятность поддержания работы узлов (R O – экспоненциальное влияние задержки $(1 - Z^p)$): отражает «воздействие на задержку» из правой части схемы. При росте междуузловых задержек (снижении Z) пропускная способность системы деградирует нелинейно, что характерно для географически распределенных сред;

– пороговое влияние согласованности ($\Phi(S)$): соответствует «компромиссу» между скоростью и точностью данных. При падении согласованности ниже критического уровня ($S < S_{кр}$) включаются штрафные коэффициенты (η), резко ограничивающие масштабируемость из-за затрат на синхронизацию.

Географическое размещение узлов.

Коррекция метрик:

$$Z_{geo} = Z(1 + \theta_d),$$

$$S_{geo} = S(1 - \theta_r), \quad (6)$$

$$U_{geo} = U(1 - \theta_f).$$

Параметры Z_{geo} , S_{geo} и U_{geo} формализуют влияние блока «Географическая среда» (правая часть рисунка):

– коэффициенты θ_d , θ_r , θ_f количественно выражают те стрелки влияния, которые на схеме ведут от географического размещения к задержкам, согласованности и устойчивости.

Для подтверждения научной гипотезы о нелинейном характере масштабируемости распределенных вычислительных систем и верификации предложенной таксономии было проведено комплексное имитационное моделирование. Целью данного этапа работы является установление численных закономерностей между архитектурными профилями и фактическими пределами расширения системы в условиях прогрессирующей нагрузки.

В качестве базиса для исследования была сконструирована модель распределенной среды, состоящей из 50 независимых вычислительных узлов, объединенных в единый кластер посредством полносвязной топологии. Входящий поток информационных запросов моделировался как случайный процесс с распределением Пуассона, где интенсивность нагрузки варьировалась от штатного режима до десятикратной перегрузки.

Для обеспечения сопоставимости физически разнородных параметров функционирования системы использовалась процедура нормирования, переводящая технические метрики в безразмерный интервал от нуля до единицы:

– параметр устойчивости (U): характеризует вероятность сохранения работоспособности узлов при возникновении локальных сбоев и рассчитывается на основе среднего времени между отказами. Значение 1,0 соответствует абсолютной доступности ресурсов;

– параметр задержки (Z): отражает временную эффективность обмена данными. Значение 1,0 соответствует минимально достижимому времени кругового обмена (20 мс), тогда как значение 0,0 фиксируется при достижении порога отказа в 2000 мс, за которым следует разрыв сетевого взаимодействия;

– параметр согласованности (S): определяет степень синхронизации данных между территориально распределенными репликами. Критический порог согласованности установлен на уровне 0,5, что соответствует запаздыванию репликации свыше 30 с.

В процессе моделирования рассматривались четыре базовых архитектурных профиля, каждый из которых обладает уникальным вектором начальных состояний.

1. Профиль низкого уровня (пакетная обработка): характеризуется умеренной начальной устойчивостью и ориентацией на объемные вычисления.

2. Сбалансированный профиль (предсказуемая нагрузка): ориентирован на стабильность при равномерном распределении запросов.

3. Высокоустойчивый профиль (критические системы): обладает повышенным резервированием ресурсов для минимизации рисков отказа.

4. Скоростной профиль (системы реального времени): настроен на достижение ми-

нимального времени отклика при допустимых рисках потери устойчивости.

Исходные данные и векторы состояний представлены в табл. 2.

Для подтверждения достоверности было проведено исследование чувствительности функции масштабируемости $F(U, Z, S)$ и моделирование поведения системы. С этой целью рассчитывалось влияние каждого фактора на итоговый предел масштабируемости через частные производные функции

$$F = U \cdot (1 - Z^p) \cdot S \quad (\text{при } S \geq S_{sp}):$$

1. По устойчивости ($\partial F / \partial U$): влияние линейно, потеря устойчивости узлов прямо пропорционально сокращает потенциал расширения.

2. По задержке ($\partial F / \partial Z$): отрицательный градиент подтверждает «хрупкость» скоростных систем: при $Z \rightarrow 1$ малейшее отклонение параметров при росте нагрузки приводит к резкому падению F .

Таблица 2

Исходные векторы состояния для исследуемых профилей таксономии

Профиль	Описание	U_0	Z_0	S_0	Приоритет
P1	Традиционная реактивная система	0,6	0,5	0,8	Накопление данных
P2	Сбалансированная архитектура	0,7	0,7	0,8	Стабильность
P3	Высокоустойчивый кластер	0,8	0,5	0,7	Отказоустойчивость
P4	Edge-вычисления (реальное время)	0,7	0,8	0,7	Минимальный отклик

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 3

Динамика показателей устойчивости и масштабируемости при росте нагрузки

Профиль	Нагрузка (k)	Устойчивость (U_k)	Задержка (Z_k)	Согласованность (S_k)	Предел F_{limit}
Профиль 1	1	0,6	0,5	0,8	0,31
	5	0,491	0,335	0,738	0,292
	10	0,383	0,203	0,668	0,232
Профиль 2	1	0,7	0,7	0,8	0,232
	5	0,573	0,469	0,738	0,287
	10	0,446	0,285	0,668	0,253
Профиль 3	1	0,8	0,5	0,7	0,362
	5	0,655	0,335	0,646	0,341
	10	0,51	0,203	0,585	0,271
Профиль 4	1	0,7	0,8	0,7	0,139
	5	0,573	0,536	0,646	0,225
	10	0,446	0,325	0,585	0,213

Примечание: составлена автором по результатам эксперимента.

В табл. 3 представлены расчеты предела масштабируемости (F_{limit}) при коэффициенте чувствительности $p = 1,5$ и деградации метрик под влиянием роста нагрузки k .

На основе анализа полученных данных численного моделирования можно сделать такие выводы:

1. Экспериментально подтверждено, что показатель предела масштабируемости (F_{limit}) не находится в линейной зависимости от кратности нагрузки (k), демонстрируя существенную деградацию (до 25 %) при достижении пиковых значений ($k = 10$) во всех исследуемых профилях.

2. Для Профиля 2 и Профиля 4 зафиксирован рост эффективности при переходе от штатной нагрузки к средней ($k = 5$), что математически доказывает существование зоны оптимального использования ресурсов, после которой наступает фаза насыщения и резкого снижения устойчивости.

3. Профиль 3 продемонстрировал наибольшую адаптивность, сохранив максимальное значение $F_{limit} = 0,271$ при экстремальной нагрузке ($k = 10$), что подтверждает теоретическую гипотезу о приоритетности механизмов отказоустойчивости над простым увеличением пропускной способности.

4. Низкие показатели Профиля 4 при пиковых нагрузках доказывают, что минимизация задержек (Z) в распределенной среде без соразмерного повышения устойчивости (U) ведет к нелинейному снижению масштабируемости и росту рисков каскадных отказов.

5. Падение параметра S ниже порога 0,6 при максимальной нагрузке во всех сценариях выступает объективным математическим маркером перехода системы в область предельной масштабируемости, требующей превентивного ограничения входящего трафика.

Для верификации преимуществ предложенной таксономии «устойчивость – задержка – согласованность» проведено сопоставление полученных авторских результатов с двумя наиболее распространенными промышленными подходами. Сравнительный анализ проводился в рамках единого контролируемого экспериментального прогона. Это обеспечило идентичность внешних условий для всех сопоставляемых методов и исключило влияние сторонних факторов на итоговые показатели.

Линейная модель: в данной модели управляющее воздействие рассчитывалось по упрощенной формуле $N = N_{old} \times k$. Система игнорировала внутренние метрики задержки (Z) и согласованности (S), предполагая, что каждый новый узел добавляет фиксированную единицу производительности.

Реактивный пороговый метод: масштабирование инициировалось классическим триггером – достижением 80% утилизации ресурсов (ЦП и ОЗУ) на текущих узлах. Задержка срабатывания (время на развертывание нового узла и включение его в балансировку) была зафиксирована на уровне 45–120 с, что соответствует стандартным показателям современных облачных платформ.

Авторский метод на базе таксономии У–З–С: управление осуществлялось через мониторинг вектора состояния. Масштабирование инициировалось при прогнозируемом отклонении функции F_{limit} более чем на 15 % от целевого значения. Время реакции составляло 5–30 с благодаря превентивной подготовке ресурсов.

Сравнительный анализ проводился по трем ключевым критериям: фактический коэффициент масштабируемости, сохраненная устойчивость системы и точность прогнозирования поведения при пиковых нагрузках ($k = 10$). Результаты анализа представлены в табл. 4.

Таблица 4

Сравнительные результаты эффективности методов масштабирования

Метод управления	Фактический коэффициент масштабируемости (М)	Сохраненная устойчивость (U)	Среднеквадратичная ошибка прогноза
Линейная модель	10,0 (теоретич.) / 5,2 (факт.)	0,28	52,40 %
Реактивный пороговый метод	6,8	0,42	24,10 %
Таксономия У–З–С	8,4	0,65	4,80 %

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования.

Полученные результаты позволили выделить следующие фундаментальные отличия разработанного в статье подхода:

1. Преодоление эффекта насыщения. Традиционные линейные модели игнорируют внутренние накладные расходы на синхронизацию данных. В результате при десятикратном росте нагрузки ($k = 10$) реальная производительность таких систем оказывается в 1,9 раза ниже прогнозируемой. Авторский метод, учитывающий параметр согласованности (S), позволяет достичь фактической масштабируемости на 23 % выше, чем у реактивных методов, за счет превентивной оптимизации векторов состояния.

2. Минимизация деградации при географическом распределении. Реактивные методы масштабирования инициируют добавление узлов только при перегрузке процессора, не учитывая задержки обмена информацией (Z). В географически распределенных средах это ведет к падению устойчивости до критических 0,38–0,42. Авторский подход, интегрирующий задержку в целевую функцию F_{limit} , сохраняет устойчивость на уровне 0,65, обеспечивая стабильное функционирование системы в условиях высокой межузловой латентности.

3. Точность инженерного расчета. Использование векторов состояния таксономии «устойчивость – задержка – согласованность» позволило снизить погрешность планирования инфраструктуры с 24,1 до 4,8 %. Это доказывает, что учет взаимных ограничений качественных метрик является более надежным инструментом управления, чем мониторинг отдельных количественных показателей нагрузки.

Заключение

Подводя итоги исследования, можно сделать такие выводы. Распределенные ИТ-системы служат основой инфраструктуры современных программных приложений, демонстрируя как трансформационный потенциал, так и присущую им сложность. Масштабируемость является фундаментальной характеристикой современных распределенных ИТ-систем, обеспечивая сохранение стабильной производительности и высокой скорости обработки данных при экспоненциальном росте нагрузки.

В статье предложена авторская таксономия «устойчивость – задержка – согласованность» в качестве новой структуры для оценки архитектурных решений в распределенных ИТ-системах. Она принципиально отличается от традиционных линейных моделей оценки масштабируемости

тем, что рассматривает процесс расширения вычислительных ресурсов не как изолированную техническую операцию, а через призму нелинейного компромисса между устойчивостью к сбоям, временными задержками и согласованностью данных.

Для верификации преимуществ авторского подхода проведено сопоставление полученных результатов с общепринятыми промышленными методами масштабирования распределенных систем, а именно: стратегией линейного наращивания ресурсов и реактивным методом на основе пороговых значений. Полученные данные подтвердили преимущество авторского подхода, выраженное в повышении фактического коэффициента масштабируемости на 23 % относительно стандартных пороговых стратегий. Использование данной таксономии на практике позволяет формализовать зависимость между выбранной стратегией масштабирования и деградацией качественных характеристик системы, что часто игнорируется в стандартных подходах, ориентированных исключительно на метрики пропускной способности.

Список литературы

1. Зейналлы Т. Э., Демидов Д. Г. Оценка масштабируемости распределенных систем на основе алгоритмов итерационного выполнения задач с координацией через хранилище ключ-значение // Программная инженерия. 2024. Т. 15. № 12. С. 611–622. DOI: 10.17587/prin.15.611-622.
2. Хардинов М. В., Эминджонов Д. Е. Архитектура распределенных систем: проблемы и решения // Научный Лидер. 2025. № 6 (207). С. 33–35. EDN: VOSOEW.
3. Faliero F., Capello E., Iannelli A. Robust Adaptive Model Predictive Control for Tracking in Interconnected Systems via Distributed Optimization // International Journal of Robust and Nonlinear Control. 2025. P. 1–20. DOI: 10.1002/rnc.70319.
4. Jianan Chen, Istas Fahrurrazi Nusyirwan, Robiah Ahmad, Fadhilah Abdul Razak, Lili Jing. A Distributed Geyser-Inspired Algorithm for Minimizing Losses in Flywheel Array Energy Storage Systems // Concurrency and Computation: Practice and Experience. 2025. Vol. 37. Is. 23–24. DOI: 10.1002/cpe.70181.
5. Батанов А. О., Литвинова А. С. Передовой подход к распределенным системам: динамические алгоритмы и эффективная обработка больших данных // Современные наукоемкие технологии. 2025. № 3. С. 8–13. DOI: 10.17513/snt.40317.
6. Котилевец И. Д., Иванова И. А. Алгоритм для распределенных систем с шардированием для инфраструктуры устройств межмашинного взаимодействия // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2024. № 3. С. 74–86. DOI: 10.18137/RNU.V9187.24.03.P.74.
7. Jinfeng Shi, Peng Wan Distributed dynamic event-triggered consensus of linear multiagent systems on time scales // Asian Journal of Control. 2024. Vol. 27. Is. 4. P. 1784–1801. DOI: 10.1002/asjc.3542.
8. Hamdi M., Kamoun S., Idoumghar L., Chaoui M., Kachouri A. Distributed joint parameter and state estimation algorithm for large-scale interconnected systems // International

Journal of Adaptive Control and Signal Processing. 2024. Vol. 38. Is. 4. DOI: 10.1002/acs.3756.

9. Иванов А. В., Огнев И. А., Никрошкин И. В., Попова Ю. А. Методика организации процесса мониторинга распределенных информационных систем // Безопасность цифровых технологий. 2023. № 4 (111). С. 9–23. DOI: 10.17212/2782-2230-2023-4-9-23.

10. Соколов И. А. Архитектурные подходы к обеспечению отказоустойчивости и масштабируемости в open-source системах контроля версий: сравнительный анализ Gitlab Ce, Gitea и Forgejo // Актуальные исследования. 2025. № 21–1 (256). С. 94–97. EDN: QEPICR.

11. Зеленцов В. А., Соболевский В. А. Сравнительный анализ технологий построения распределенных информационных автоматизированных систем комплексного моделирования сложных объектов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2025. № 10. С. 37–47. DOI: 10.25791/prigor.10.2025.1623.

12. Zhongzhe Hu, Junmin Xiao, Ninghui Sun, Guangming Tan. Fast and accurate variable batch size convolution neural

network training on large scale distributed systems // Concurrency and Computation: Practice and Experience. 2022. Vol. 34. Is. 21. DOI: 10.1002/cpe.7119.

13. Wenrui Ma, Zuhua Xu, Jun Zhao, Shuangxi Zhang, Zhi-jiang Shao. Cooperative distributed extremum seeking control for coupled multiagent systems based on distributed identification-gradient tracking // International Journal of Adaptive Control and Signal Processing. 2023. Vol. 37. Is. 10. DOI: 10.1002/acs.3652.

14. Xiaojuan Xue, Dan Zhang, Zhengtao Ding, Li Xu. Distributed Stochastic Control for a Class of Discrete-Time Interconnected Systems with Communication Losses // International Journal of Robust and Nonlinear Control. 2025. Vol. 35. Is. 12. DOI: 10.1002/rnc.7962.

15. Дойчев В. С. Применение гибридного алгоритма балансировки для управления распределением вычислительных задач в высоконагруженных системах // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2025. Т. 13. № 3 (50). URL: <https://moitvvt.ru/journal/pdf?id=1998> (дата обращения: 15.12.2025). DOI: 10.26102/2310-6018/2025.50.3.024.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.



ОТДАЛЕННЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ РУДЫ НА ЛЕЙКОЦИТЫ ПЕРИФЕРИЧЕСКОЙ КРОВИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

**Каюмова А. Ф. ORCID ID 0000-0003-1983-1392,
Габдулхакова И. Р. ORCID ID 0000-0002-8416-0719,
Зиякаева К. Р. ORCID ID 0000-0002-3923-2736,
Киселева О. С. ORCID ID 0000-0001-7935-3228,
Надыршина Д. Д. ORCID ID 0000-0001-8981-688X,
Фазлыяхметова М. Я. ORCID ID 0009-0008-2208-4918**

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Башкирский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения
Российской Федерации, Уфа, Российская Федерация, e-mail: krziyak@yandex.ru*

Проблема интоксикации тяжелыми металлами остается актуальной для работников горнорудной промышленности, подвергающихся постоянному профессиональному контакту с рудой. Цель исследования состояла в определении степени воздействия рудного порошка на лейкоциты периферической крови крыс. Работа выполнена на беспородных белых крысах-самцах. Для оценки выраженности эндогенной интоксикации и токсического воздействия тяжелых металлов на организм экспериментальных животных рассчитывали интегральные лейкоцитарные индексы периферической крови крыс. В лейкограмме были выявлены следующие значительные изменения: так, на 60-е сутки отмечался лейкоцитоз (нейтрофилия, эозинофилия), а на 90-е сутки наблюдалась лейкопения (эозинопения, лимфопения и моноцитоз), что указывало на наличие признаков токсического воздействия исследуемой руды на органы лейкопоэза и клетки периферической крови крыс. В лейкоцитарной формуле наблюдалось увеличение относительного количества моноцитов, что, возможно, связано с изменением активности гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой системы. Выброс в циркулирующую кровь юных форм нейтрофилов указывал на функциональную несостоятельность и срыв защитных механизмов лейкоцитарного звена. Повышение эозинофильных лейкоцитов по мере развития интоксикации рудой на 60-е сутки свидетельствовало о развитии аллергической реакции замедленного типа на фоне хронического воздействия компонентов руды на систему крови и костного мозга. Анализ лейкоцитарных индексов позволил глубже изучить особенности иммунного ответа при хронической интоксикации медно-цинковой колчеданной рудой. Выявленные изменения интегральных лейкоцитарных индексов подтвердили наличие интоксикации в организме крыс и отразили специфику течения хронического воспалительного процесса под воздействием руды.

Ключевые слова: руда, крыса, лейкоцитарные индексы, лейкоцитарный индекс интоксикации

LONG-TERM EFFECTS OF ORE ON PERIPHERAL BLOOD LEUKOCYTES IN EXPERIMENT

**Kayumova A. F. ORCID ID 0000-0003-1983-1392,
Gabdulkhakova I. R. ORCID ID 0000-0002-8416-0719,
Ziyakaeva K. R. ORCID ID 0000-0002-3923-2736,
Kiseleva O. S. ORCID ID 0000-0001-7935-3228,
Nadyrshina D. D. ORCID ID 0000-0001-8981-688X,
Fazlyakhmetova M. Ya. ORCID ID 0009-0008-2208-4918**

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Bashkir State Medical University” of the Ministry of Health
of Russian Federation, Ufa, Russian Federation, e-mail: krziyak@yandex.ru*

The problem of heavy metal intoxication remains relevant for mining workers who are in constant professional contact with ore. The purpose of the study was to determine the degree of exposure of the ore powder to rat peripheral blood leukocytes. The work was done on male purebred white rats. To assess the severity of endogenous intoxication and the toxic effects of heavy metals on the body of experimental animals, integral leukocyte indices of peripheral blood of rats were calculated. The following significant changes were identified in the leukogram; leukocytosis (neutrophilia, eosinophilia) was observed on day 60, and leukopenia (eosinopenia, lymphopenia and monocytosis) was observed on day 90, which indicated signs of toxic effects of the test ore on the leukopoietic organs and peripheral blood cells rats. An increase in the relative number of monocytes was observed in the leukocyte formula, which is possibly due to a change in the activity of the hypothalamic-pituitary-adrenal system. The release of young forms of neutrophils into the circulating blood indicated functional failure and disruption of the protective mechanisms of the leukocyte link. An increase in eosinophilic leukocytes with the development of ore intoxication on the 60th day indicated the development of an allergic reaction of a delayed type against the background of chronic exposure of ore components to the blood and bone marrow system. Analysis of leukocyte indices allowed to study more deeply the features of the immune response in chronic intoxication with copper-zinc pyrite ore. The identified changes in the integral leukocyte indices confirmed the presence of intoxication in the body of rats and reflected the specifics of the course of the chronic inflammatory process under the influence of ore.

Keywords: ore, rat, leukocyte indices, leukocyte intoxication index

Введение

Проблема интоксикации тяжелыми металлами остается актуальной для работников горнорудной промышленности, подвергающихся постоянному профессиональному контакту с рудой [1, 2]. Согласно литературным данным, геохимическая специфика рудного производства негативно влияет на здоровье населения, проживающего вблизи месторождений [2]. Ряд исследований посвящен анализу профессиональной заболеваемости на предприятиях по добыче и обогащению руд цветных металлов [3, 4]. В ряде работ показано, что соединения кадмия и мышьяка вызывают изменения в гемопоэзе [4–6]. Общий анализ крови с помощью автоматизированного гематологического анализатора позволяет определить не только количество лейкоцитов, но также идентифицировать лейкоциты по видам гранул в цитоплазме и рассчитывать количество клеток каждого типа лейкоцитов [7–9]. Интегральные лейкоцитарные индексы широко применяются для раннего прогнозирования и диагностики острых инфекций благодаря их легкодоступности и возможности быстрого определения [7].

Цель исследования – определение степени воздействия рудного порошка на лейкоциты периферической крови крыс.

Материалы и методы исследования

Эксперимент был проведен на беспородных крысах-самцах массой 200±10 г. Животные случайно распределили на группы следующим образом: группа 1 (n = 10) – контрольная, группа 2 (n = 10) – интоксикация рудой в течение 60 дней, группа 3 (n = 10) – интоксикация рудой в течение 90 дней. Опытные крысы вместе с кормом получали руду в измельченном виде из расчета 600 мг/кг/сут согласно ранее разработанной авторами методике [2, 3]. Анализ образца руды был выполнен на атомно-абсорбционном спектрометре (Shimadzu AA

6200, Япония) и рентген-флуоресцентном спектрометре (Shimadzu EDX 800, Япония) в Управлении государственного аналитического контроля Республики Башкортостан (табл. 1) [2, 3].

Для оценки степени интоксикации животных под влиянием МЦКР рассчитывали следующие лейкоцитарные индексы [4–6].

Лейкоцитарный индекс интоксикации (ЛИИ) – показатель, отражающий степень воспалительного «сдвига» клеток белого ростка крови, рассчитывали по В. К. Островскому как соотношение (%) нейтрофилов (палочкоядерных и сегментоядерных) к сумме лимфоцитов, моноцитов и эозинофилов [5, 7].

Лейкоцитарный индекс (ЛИ) – соотношение (%) лимфоцитов к нейтрофилам, характеризующее взаимодействие гуморального и клеточного звеньев иммунной системы.

Ядерный индекс Г. Д. Даштаянца (ЯИ) – процентное отношение суммы моноцитов и палочкоядерных нейтрофилов к уровню сегментоядерных нейтрофилов [7].

Индекс Кребса (ИК) – процентное соотношение общего количества нейтрофилов к лимфоцитам; служит маркером интоксикации [7].

Индекс сдвига лейкоцитов периферической крови (ИСЛК) – отражает соотношение гранулоцитов и агранулоцитов. Рассчитывается как отношение (%) суммы эозинофилов, базофилов и нейтрофилов к сумме моноцитов и лимфоцитов [7].

Индекс соотношения нейтрофилов и моноцитов (ИСНМ) – показывает равновесие между (%) нейтрофилами и моноцитами, позволяя оценить состояние микрофагально-макрофагальной системы [7].

Индекс соотношения лимфоцитов и моноцитов (ИСЛМ) – демонстрирует баланс между лимфоцитами и моноцитами, отражая взаимодействие аффлекторного и эффекторного звеньев иммунологического процесса [7].

Таблица 1

Процентное содержание металлов в медно-цинковой колчеданной руде

Оксид	Доля оксида в пробе	Доля металла в пробе	Оксид	Доля оксида в пробе	Доля металла в пробе
1 Fe ₂ O ₃	17,603	12,312	6 CuO	0,123	0,0978
2 SiO ₂	12,803	12,803	7 As ₂ O ₃	0,083	0,063
3 P ₂ O ₅	2,541	5,985	8 PbO	0,065	0,060
4 ZnO	2,465	2,258	9 MnO	0,060	0,046
5 CaO	0,565	0,404	10 CdO	0,01	0,0088

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования

Индекс алергизации (ИА) – рассчитывается по формуле

$$\text{ИА} = (\text{лимфоциты} + 10 \times (\text{эозинофилы} + 1) / (\text{палочкоядерные нейтрофилы} + \text{сегментоядерные нейтрофилы} + \text{моноциты} + \text{базофилы}) [4, 5, 7].$$

Полученные данные анализировали с помощью программы STATISTICA 10 (StatSoft, США), рассчитывали медиану (Me), интерквартильные размахи (Q1; Q3), статистическую значимость отличий испытуемой группы от группы сравнения оценивали с помощью непараметрических критериев Манна – Уитни и Краскела – Уоллиса, ($p < 0,05$ и $p < 0,01$) [2, 3]. Эксперимент был одобрен биоэтическим советом ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет» Минздрава России (Протокол № 5 13.09.2017).

Результаты исследования и их обсуждение

Эксперимент показал, что трехмесячное воздействие МЦКР на организм опытных крыс в условиях хронической интоксикации привело к существенным изменениям лейкоцитарной картины периферической крови (табл. 2).

На 60-е сутки эксперимента у крыс зафиксировано статистически значимое повышение в 1,2 раза абсолютного количества лейкоцитов относительно значений контрольной группы. К завершению исследования (90-е сутки) общее число лейкоцитов снизилось в 1,2 раза по сравнению с контрольными значениями, что свидетельствует о развитии лейкопении.

Изменения в популяции нейтрофилов: в оба срока наблюдения отмечался выраженный нейтрофилез: на 60-е сутки относительное количество сегментоядерных нейтрофилов возросло в 1,25 раза; на 90-е сутки – в 1,8 раза. Параллельно с увеличением

числа сегментоядерных нейтрофилов в периферической крови наблюдалось повышение количества палочкоядерных нейтрофилов. Вероятно, это связано с усиленным выходом данных клеток из костного мозга в системный кровоток.

Динамика эозинофилов. На 60-е сутки зафиксировано статистически значимое увеличение относительного количества эозинофилов в периферической крови – в 1,5 раза (табл. 1). По мере накопления МЦКР в организме и нарастания интоксикации развивалась эозинофилия. Однако к 90-м суткам эксперимента наблюдалась противоположная тенденция – эозинопения: относительное количество эозинофилов снизилось в 2,0 раза по сравнению с контрольной группой (табл. 1). Снижение числа эозинофилов при стрессовых воздействиях, как правило, обусловлено их перераспределением из кровотока в ткани организма [8–10].

Изменения моноцитов и лимфоцитов. В периферической крови белых крыс отмечалось повышение числа моноцитов: на 60-е сутки – в 1,6 раза; на 90-е сутки – в 2,0 раза. На 90-е сутки увеличение количества моноцитов по сравнению с контролем достигло статистической значимости (1,3 раза; табл. 1). Ранее в ходе изучения гистоморфологических изменений при хронической интоксикации МЦКР авторы наблюдали обширную генерализованную лимфомакрофагальную инфильтрацию в печени и легких [8]. Относительное количество лимфоцитов снизилось в 1,3 раза на 60-е сутки эксперимента (табл. 1).

Таблица 2

Динамика количества лейкоцитов крыс (Me, Q1; Q3)

Показатель	Группа 1, контрольная	Группа 2, 60 дней интоксикации	Группа 3, 90 дней интоксикации
Лейкоциты, $10^9/\text{л}$	17,84 [14,12–19,43]	21,54* [21,31–25,14]	15,43* [14,56–17,33]
Лимфоциты, %	76,05 [72,0–78,0]	67,10* [65,34–67,42]	58,3** [58,22–70,34]
Моноциты, %	5,0 [4,0–5,0]	8,0** [7,0–9,0]	10,0** [8,0–11,0]
Сегментоядерные нейтрофилы, %	16,0 [14,23–17,34]	20,0* [19,33–22,42]	29,0** [27,34–29,40]
Палочкоядерные нейтрофилы, %	1,0 [0,5–1,0]	2,0* [1,0–2,0]	2,0* [1,0–2,0]
Эозинофилы, %	2,0 [1,0–3,0]	3,0* [3,0–5,0]	1,0* [0,8–1,5]

Примечание: статистически значимые отличия опытных групп по отношению к контрольной группе: * – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$.

Составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 3

Лейкоцитарные индексы крыс (Ме, Q1; Q3)

Индексы	Группа 1, контрольная	Группа 2, 60 дней интоксикации	Группа 3, 90 дней интоксикации
Лейкоцитарный индекс интоксикации (ЛИИ)	0,07 [0,06–0,08]	0,08 [0,07–0,09]	0,24* [0,20–0,25]
Лейкоцитарный индекс (ЛИ)	4,47 [4,45–4,51]	3,05* [2,86–3,12]	1,87* [1,66–1,95]
Ядерный индекс (ЯИ)	0,38 [0,36–0,41]	0,51* [0,48–0,53]	0,41 [0,38–0,43]
Индекс Кребса (ИК)	0,22 [0,19–0,24]	0,33* [0,28–0,35]	0,53* [0,48–0,56]
Индекс сдвига лейкоцитов периферической крови (ИСЛК)	0,23 [0,21–0,26]	0,33* [0,31–0,36]	0,47* [0,45–0,49]
Индекс соотношения нейтрофилов и моноцитов (ИСНМ)	3,40 [3,26–3,42]	2,75* [2,53–2,86]	3,10 [2,87–3,23]
Индекс соотношения лимфоцитов и моноцитов (ИСЛМ)	15,21 [14,78–16,23]	8,38** [7,78–8,56]	5,81** [5,62–6,13]
Индекс алергизации (ИА)	4,82 [4,52–4,87]	3,57* [3,23–3,72]	1,95** [1,34–2,12]

Примечание: статистически значимые отличия опытных групп по отношению к контрольной группе: * – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$.

Составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Оценка признаков интоксикации. Лейкоцитарные индексы, представленные в табл. 2, позволили объективно оценить признаки интоксикации у крыс, подвергавшихся воздействию МЦКР в течение 2-го и 3-го месяцев (табл. 3).

Анализ лейкоцитарных индексов при хронической интоксикации МЦКР [2]. Для оценки характера интоксикационных процессов, особенно при хронических стрессовых воздействиях, ключевое значение имеет лейкоцитарный индекс интоксикации (ЛИИ). В ходе эксперимента выявлено статистически значимое увеличение ЛИИ на 90-е сутки – в 3,4 раза относительно контрольных значений.

Лейкоцитарный индекс (ЛИ), отражающий функциональное состояние лимфоцитарной системы и общую реактивность организма, демонстрировал устойчивую тенденцию к снижению: на 60-е сутки – в 1,47 раза по сравнению с контролем; на 90-е сутки – в 2,41 раза.

Ядерный индекс Г. Д. Даштаянца (ЯИ) показал следующую динамику: на 60-е сутки – рост в 1,32 раза относительно контроля; к завершению эксперимента (90-е сутки) – снижение в 1,58 раза по сравнению с контрольными показателями [5, 7, 11].

Индекс Кребса (ИК), свидетельствующий об активности фагоцитарных реакций и факторов специфического иммунитета, продемонстрировал прогрессивное увеличение: на 60-е сутки – в 1,51 раза; на 90-е сутки – в 2,41 раза. Такая динамика указывает на функциональное угнетение пролиферативной активности костного мозга [7].

Индекс сдвига лейкоцитов периферической крови (ИСЛК), используемый для оценки реактивности организма при воспалении и раздражении (отражает соотношение гранулоцитов и агранулоцитов) [10], показал: рост в 1,43 раза на 60-е сутки; увеличение в 2,04 раза на 90-е сутки. Основной причиной такого изменения стало повышение процентной доли гранулоцитов, что свидетельствует о нарушении иммунологической реактивности у экспериментальных крыс.

Индекс соотношения лимфоцитов и моноцитов (ИСЛМ) продемонстрировал статистически значимое снижение: в 1,82 раза на 60-е сутки; в 2,62 раза на 90-е сутки. Подобная динамика, вероятно, связана с повышением уровня моноцитов в периферической крови и указывает на формирующиеся нарушения иммунного ответа под воздействием МЦКР [7].

Индекс алергизации (ИА), выступающий этиологическим маркером воспалительных процессов, показал снижение: в 1,35 раза на 60-е сутки; в 2,47 раза на 90-е сутки (данные представлены в табл. 2).

Адаптационные реакции организма в ответ на длительное воздействие медно-колчеданной руды в значительной мере выражаются в количественном и качественном изменении лейкоцитарной формулы периферической крови. Степень этих изменений зависит не только от силы и характера внешних воздействий, но и от реактивности организма [4, 11].

Полученные авторами данные свидетельствуют о компенсаторном повышении содержания лейкоцитов в крови к 60-м сут-

кам при длительном воздействии исследуемой руды. В лейкоцитарной формуле наблюдалось увеличение относительного количества моноцитов, что, возможно, связано с изменением активности гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой системы. Выброс в циркулирующую кровь юных форм нейтрофилов указывал на функциональную несостоятельность и срыв защитных механизмов лейкоцитарного звена. Повышение эозинофильных лейкоцитов по мере развития интоксикации рудой на 60-е сутки свидетельствовало о развитии аллергической реакции замедленного типа на фоне хронического воздействия компонентов руды на систему крови и костного мозга [6–8].

При длительном воздействии соединений тяжелых металлов в составе МЦКР на организм животных, на фоне развития определенных компенсаторных реакций, наблюдалось снижение адаптационных возможностей функциональной системы крови [3]. Ранее было показано, что одной из причин угнетения эритропоэза при введении руды может являться нарушение функциональных свойств костномозговых макрофагов, поддерживающих процессы дифференцировки и созревания эритробластов в эритробластических островках [7]. Вполне вероятно, что негативное влияние МЦКР затронуло как эритроцитарное звено [3], так и лейкоцитарное [2, 6]. Повышение сегментоядерных нейтрофилов, наряду со снижением количества лейкоцитов на протяжении всего эксперимента соотносится с аналогичными данными литературы при исследовании влияния кадмия на гематологические показатели у кроликов [9]. Соединения тяжелых металлов в составе МЦКР воздействовали на морфофункциональное состояние клеток крови и костного мозга, обусловленное вмешательством в процессы перекисного окисления липидов, синтеза ДНК, окислительного фосфорилирования у животных [6, 7].

В лейкограмме были выявлены следующие значительные изменения: так, на 60-е сутки отмечался лейкоцитоз (нейтрофилез, эозинофилия), а на 90-е сутки наблюдалась лейкопения (эозинопения, лимфопения и моноцитоз), что указывало на наличие признаков токсического воздействия МЦКР на органы лейкопоэза и клетки периферической крови.

Лимфопения, возможно, была вызвана выходом клеток из кровотока и воспалительным процессом в ткани, что указывало на напряженность иммунного ответа [8, 9]. К концу эксперимента (90-е сутки) авторы наблюдали усиление воспаления, о чем свидетельствовали мононуклеарная и лим-

фоцитарная инфильтрация тканей. В проведенных ранее исследованиях авторами было обнаружено, что введение руды в организм животных привело к воспалительным процессам в ткани желудка, повреждению гепатоцитов, а в легочной ткани появились признаки бронхопневмонии [6–8]. Под воздействием МЦКР наблюдалось системное нарушение гомеостаза [4, 10, 12]. Лейкоцитарные индексы позволили оценить уровень иммунологической реактивности [13, 14]. Проведенное исследование позволило определить неспецифические адаптационные реакции у исследуемых животных [10, 15].

Заключение

Выброс в циркулирующую кровь юных форм нейтрофилов указывал на функциональную несостоятельность и срыв защитных механизмов лейкоцитарного звена. Повышение эозинофильных лейкоцитов по мере развития интоксикации рудой на 60-е сутки свидетельствовало о развитии аллергической реакции замедленного типа на фоне хронического воздействия компонентов руды на систему крови и костного мозга. Анализ лейкоцитарных индексов позволил глубже изучить особенности иммунного ответа при хронической интоксикации медно-цинковой колчеданной рудой. Изменения интегральных лейкоцитарных индексов свидетельствовали о хроническом воспалении и подтвердили наличие интоксикации в организме исследуемых крыс в условиях длительного воздействия руды.

Список литературы

1. Новикова М. А., Пушкарев Б. Г., Судаков Н. П., Никифоров С. Б., Гольдберг О. А., Явербаум П. М. Влияние хронической свинцовой интоксикации на организм человека // Байкальский медицинский журнал. 2013. Т. 117 (2). С. 13–16. URL: <https://www.bmjjour.ru/jour/issue/view/issue/42/29> (дата обращения: 18.03.2026).
2. Самоходова Т. С., Каюмова А. Ф., Зиякаева К. Р., Киселева О. С. Влияние медно-цинковой колчеданной руды на костный мозг и лейкоциты крови в эксперименте // Вестник Башкирского государственного медицинского университета. 2022. Специальный выпуск № 5. С. 180–185. URL: <http://s.siteapi.org/7bd21d3a35e453b.ru/docs/4rt1rcaxr20w0oock88ocgooccs4k> (дата обращения: 18.03.2026).
3. Зиякаева К. Р. Исследование воздействия медно-цинковой колчеданной руды на эритропоэз в эксперименте: дис. ... канд. биол. наук. Екатеринбург, 2020. 191 с. [Электронный ресурс]. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_010254001/ (дата обращения: 18.03.2026).
4. Тимашева Г. В., Репина Э. Ф., Бакиров А. Б., Гильманов А. Ж., Валеева О. В., Фагамова А. З. Применение интегральных лейкоцитарных индексов при оценке степени токсического влияния химических факторов на организм работников химического производства // Медицинский алфавит. 2016. Т. 3 (19). С. 97–98. URL: <https://www.med-alphabet.com/jour/issue/archive?issuesPage=2#issues> (дата обращения: 18.03.2026).

5. Громов М. И., Рысев А. В., Журавлев Ю. Ф., Пивоварова Л. П., Арискина О. Б., Маркелова Е. В. Лейкоцитарный индекс интоксикации по В. К. Островскому как критерий оценки бактериальной инфекции // Вестник хирургии имени И. И. Грекова. 2023. Т. 182 (2). С. 53–58. DOI: 10.24884/0042-4625-2023-182-2-53-58.
6. Гайнуллина А. А., Габдулхакова И. Р., Каюмова А. Ф., Зиякаева К. Р., Самоходова О. В. Состояние печени крыс в токсигенный период интоксикации полихлорированными бифенилами // Казанский медицинский журнал. 2025. Т. 106 (1). С. 70–78. URL: <https://kazanmedjournal.ru/kazanmedj/article/view/627352> (дата обращения: 23.03.2026). DOI: 10.17816/KMJ627352.
7. Ермашкевич Е. И., Клетикова Л. В., Мартынов А. Н., Якименко Н. Н. О возможности применения лейкоцитарных индексов в комплексной диагностике субклинических гепатозов у кур-несушек // Успехи современной науки и образования. 2016. № 2. С. 161–165. URL: <https://www.modernsciencejournal.org/>. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25447250> (дата обращения: 19.03.2026). EDN: VKWKPV.
8. Yihui Wang, Zhihong Xu, Yuhua Zhou, Mengqi Xie, Xing Qi, Zhiwei Xu, Qi Cai, Huiqiu Sheng, Erzhen Chen, Bing Zhao, Enqiang Mao Leukocyte cell population data from the blood cell analyzer as a predictive marker for severity of acute pancreatitis // J. Clin. Lab. Anal. 2021. Vol. 35. Is. 7. e23863. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34062621/> (дата обращения: 29.03.2026). DOI: 10.1002/jcla.23863.
9. Искалиев Е. А., Малахова Л. В., Решетняк В. В., Бурдейный В. В. Лейкоцитарные индексы крыс // Развитие науки и практики в контексте глобальных вызовов: сборник статей по материалам 75-й Международной научно-практической конференции (г. Караваево, 25 января 2024 г.) Караваево: Издательство ФГБОУ ВО «Костромская государственная сельскохозяйственная академия», 2024. С. 74–79. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=67096790&selid=67096811> (дата обращения: 29.03.2026). EDN: OEONBP.
10. Ткаченко Е. А., Дерхо М. А. Лейкоцитарные индексы при экспериментальной кадмиевой интоксикации мышей // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2014. Т. 47 (3). С. 81–83. URL: <https://orensau.ru/ru/nauka/izvestiya-orenburgskogo-gau> (дата обращения: 25.03.2026). EDN: SJDSID.
11. Махнева Н. В., Сюч Н. И., Кузнецова Н. А. Неспецифические адаптационные реакции у амбулаторных пациентов дерматовенерологического профиля // Российский журнал кожных и венерических болезней. 2021. Т. 24 (6). С. 553–563. URL: <https://rjsvd.com/1560-9588/article/view/100773> (дата обращения: 29.03.2026). DOI: 10.17816/dv100773.
12. Клетикова Л. В., Вирзум Л. В., Шашурина Ю. Н., Терентьев С. С., Горбунов П. А. Динамика лейкоцитов и лейкоцитарных индексов как маркеров адаптационных процессов у ягнят после отъема // Вестник Чувашского государственного аграрного университета. 2025. Т. 34 (3). С. 59–67. URL: <http://vestnik.academy21.ru> (дата обращения: 30.03.2026). DOI: 10.48612/vch/79nt-x53h-a1nn.
13. Извин А. И., Рудзевич А. В. Лейкоцитарные индексы интоксикации при различных формах хронического тонзиллита, ассоциированного с хроническим описторхозом // Современные тенденции в развитии оториноларингологии: сборник трудов Межрегиональной научно-практической конференции оториноларингологов СКФО с международным участием (г. Махачкала, 05 июля 2024 г.). Махачкала: ИПЦ ДГМУ, 2024. С. 90–94. URL: <https://elibrary.ru/tskqt> (дата обращения: 28.03.2026). EDN: ORMCOZ.
14. Жуков А. П., Шарафутдинова Е. Б., Датский А. П. Информативность лейкоцитарных индексов в лабораторном скрининге легочной патологии у телят // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2016. Т. 59 (3). С. 101–104. URL: <https://orensau.ru/ru/nauka/izvestiya-orenburgskogo-gau> (дата обращения: 30.03.2026). EDN: ZFOXTN.
15. Калимуллин И. Ф., Шарафутдинова Е. Б., Жуков А. П. Использование интегральных лейкоцитарных индексов в оценке влияния стрессирующих факторов на гомеостаз коз // Известия ТСХА. 2023. № 3. С. 148–157. URL: <https://izvestia.timacad.ru/jour/article/view/293> (дата обращения: 29.03.2026). DOI: 10.26897/0021-342X-2023-3-148-157.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.



ВЛИЯНИЕ РАСТЕНИЙ-ФИТОМЕЛИОРАНТОВ И КОНСОРЦИУМА СОЛЕУСТОЙЧИВЫХ БАКТЕРИЙ НА СОЛЕВОЙ РЕЖИМ ПОЧВ

¹Смирнова И. Э. ORCID ID 0000-0001-5854-1529,

¹Баймаханова Г. Б. ORCID ID 0000-0001-5416-3209,

²Алдабергенов М. К. ORCID ID 0000-0001-6421-2668,

¹Рахметова Я. У. ORCID ID 0009-0007-8259-7953

¹Товарищество с ограниченной ответственностью
«Научно-производственный центр микробиологии и вирусологии»,
Алматы, Республика Казахстан;

²Товарищество с ограниченной ответственностью
«Научно-производственный центр агроинженерии»,
Алматы, Республика Казахстан, e-mail: iesmirnova@mail.ru

Во всем мире отмечается рост засоления почв, которое отрицательно влияет на продуктивность культур и представляет серьезную угрозу продовольственной безопасности стран. Целью работы было изучение влияния консорциума солетолерантных азотфиксирующих и фосфатмобилизирующих бактерий на рост и развитие растений-фитомелиорантов в условиях солевого стресса и исследование совместного влияния растений-фитомелиорантов и консорциума бактерий на солевой режим почв. В качестве растений-фитомелиорантов использовали донник желтый (*Melilotus officinalis* L.), житняк (*Agropyron cristatum* L.) и люцерну (*Medicago sativa* L.). В опытах использовали два солетолерантных штамма азотфиксирующих и фосфатмобилизирующих бактерий. В результате проведенных исследований показано, что применение консорциума бактерий для инокуляции семян повышает всхожесть, стимулирует рост и увеличивает урожайность зеленой массы растений-фитомелиорантов на засоленной почве. Установлено, что подсев семян растений-фитомелиорантов в старовозрастную дернину оказывает высокий мелиоративный эффект и положительно влияет на рассоление почв. Показано, что одновременное применение растений-фитомелиорантов и консорциума бактерий больше влияет на процесс рассоления почв. Таким образом, совместное применение растений-фитомелиорантов и консорциума бактерий является реальным путем мелиорации деградированных почв, снижения засоленности и будет способствовать повышению урожайности сельскохозяйственных культур на засоленных почвах.

Ключевые слова: растения-фитомелиоранты, консорциум бактерий, азотфиксирующие бактерии, фосфатмобилизирующие бактерии, стимуляция роста, засоленность почв

EFFECT OF PHYTO-MELIORANTS AND A CONSORTIUM OF SALT-TOLERANT BACTERIA ON SOIL SALT REGIME

¹Smirnova I. E. ORCID ID 0000-0001-5854-1529,

¹Baymakhanova G. B. ORCID ID 0000-0001-5416-3209,

²Aldabergenov M. K. ORCID ID 0000-0001-6421-2668,

¹Rakhmetova Ya. U. ORCID ID 0009-0007-8259-7953

¹Limited Liability Partnership “Research and Production Center
of Microbiology and Virology”, Almaty, Republic of Kazakhstan;

²Limited Liability Partnership “Research and Production Center of Agroengineering”,
Almaty, Republic of Kazakhstan, e-mail: iesmirnova@mail.ru

Soil salinity is increasing worldwide, negatively impacting crop productivity and posing a serious threat to food security. The aim of this study was to investigate the effect of a consortium of salt-tolerant nitrogen-fixing and phosphate-mobilizing bacteria on the growth of phytomeliiorant plants under salt stress conditions and the combined effect of the phytomeliiorant plants and the consortium on soil salinity. The following were used as phytomeliiorants in the experiments: yellow sweet clover (*Melilotus officinalis* L.), wheat grass (*Agropyron cristatum* L.) and alfalfa (*Medicago sativa* L.). Two strains of salt-tolerant nitrogen-fixing and phosphate-mobilizing bacteria were used. The conducted research showed that the use of a consortium of salt-tolerant bacteria for inoculating the seeds of phytomeliiorant plants increases germination, stimulates growth and increases the yield of green mass of plants in saline soil. It has been established that overseeding phytomeliiorant plants into old-growth turf has a significant ameliorative effect and positively influences soil desalination. The simultaneous use of phytomeliiorant plants and a bacterial consortium to have a greater impact on soil desalination has been shown. Thus, the combined use of phytomeliiorants and salt-tolerant bacteria is a real way to improve degraded soils and reduce their salinity and will contribute to increasing the productivity of agricultural crops on saline soils.

Keywords: phytomeliiorant plants, bacterial consortium, nitrogen-fixing bacteria, phosphate-mobilizing bacteria, growth stimulation, soil salinity

Введение

Во всем мире отмечается рост засоленных почв, и в настоящее время засолению подвергнуто более 35 % обрабатываемых земель. Причем доля их продолжает расти со средним приростом до 10 % в год, что становится одной из основных проблем при производстве продуктов питания. Прогнозируется, что к 2050 г. 50 % всех пахотных земель будут затронуты засолением [1]. Засоленность отрицательно влияет на продуктивность растений и представляет серьезную угрозу продовольственной безопасности. Отмечено, что засоление происходит в основном на орошаемых засушливых землях, где 20–50 % территории уже считается засоленной [2, с. 6010]. Причем из-за изменения климата темпы засоления ускорятся, так как увеличится площадь земель, нуждающихся в орошении, и повысится объем воды для их орошения.

Производство сельскохозяйственных культур на засоленных почвах сталкивается со многими проблемами. Большинство агрокультур чувствительны к соли и не могут расти на засоленных почвах. Поэтому высокая засоленность почв представляет собой серьезную проблему для производства культур и приводит к снижению их урожайности, а в некоторых случаях и к гибели всего урожая. Изменение структуры почвы, которое происходит под влиянием засоления, крайне трудно восстановить, и во многих случаях оно вызывает необратимую деградацию сельскохозяйственных земель. Засоленные почвы содержат высокие концентрации солей в своих растворах, которые из-за гиперосмотического стресса отрицательно влияют на все аспекты развития растений, включая прорастание, вегетативный рост и репродуктивное развитие. Также солевой стресс вызывает метаболические и физиологические нарушения в самих растениях, что приводит к нарушению деления клеток, подавлению фотосинтеза и дыхания растений, вызывает осмотический стресс и дисбаланс питательных веществ. Показано, что солевой стресс вызывает повреждение растений из-за избыточного накопления в корневой зоне растений растворимых ионов Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} [3]. Все эти процессы снижают доступность воды для растений, концентрацию кислорода в почве, то есть ограничивают приток воды и воздуха к корням растений, что подавляет их развитие растений [4, с. 356]. Поэтому восстановление засоленных земель является крайне актуальной проблемой для повышения продуктивности культур и обеспечения устойчивого развития сельского хозяйства.

Для восстановления засоленных почв используют различные методы рекультивации, такие как физическая мелиорация: вспашка, рыхление, пескоструйная обработка, инверсия профиля; химическая мелиорация – обработка почвы различными реагентами: гипсом, хлоридом кальция, известняком, серной кислотой, серой, сульфатом железа; электромелиорация – обработка почвы электрическим током; биологическая мелиорация [5, с. 3216]. Наиболее перспективным методом является биологическая мелиорация, к которой относится фитомелиорация засоленных земель. Фитомелиорация является более дешевой и эффективной альтернативой восстановления почв по сравнению с физическими и химическими методами. Этот способ основан на снижении засоленности с помощью солеустойчивых растений, способных удалять избыток солей посредством катионного обмена в корневой зоне растений [6]. В ходе этого процесса снижается засоленность почвенного раствора, улучшается стабильность агрегатов почв, ее гидрологические свойства и повышается доступность питательных веществ для растений. Фитомелиорация обеспечивает удаление солей из глубоких слоев почвы и является экологически чистым способом, не оказывающим отрицательного влияния на окружающую среду [7, с. 719]. Также улучшение свойств почв облегчает дальнейшее выращивание несолеустойчивых культур на засоленных землях.

В значительной степени на эффективность фитомелиорации влияет вид растений [8, с. 1438–1448]. Потенциальными видами являются солеустойчивые растения, которые обладают опреснительными свойствами, повышают биологическую активность засоленных почв и улучшают ее структуру. Причем наибольший эффект достигается при использовании аборигенных растений, приспособленных к почвенно-климатическим условиям определенного региона [9, с. 437]. В этой связи актуально применение местных солеустойчивых многолетних трав для фитомелиорации засоленных почв.

Для фиторемедиации почв пастбищ засушливых и полузасушливых регионов Казахстана наиболее перспективными растениями-фитомелиорантами являются амарант, донник, люцерна, сорго, сафлор и др. Эти растения являются аборигенными для Казахстана, приспособленными к его почвенно-климатическим условиям. Они способствуют инфильтрации воды, вымыванию солей, снижают концентрацию ионов солей в почве путем накопления их в своей биомассе [10, с. 14–28]. Кроме этого, они по-

вышают содержание биологического азота почвы, характеризуются высокой питательной ценностью и служат кормом животным [11, с. 2176]. Однако, хотя эти растения являются солеустойчивыми, они подвергаются сильному солевому стрессу и нуждаются в поддержке. Для стимуляции роста и развития растений на засоленных почвах применяют ризосферные микроорганизмы, способные повышать солеустойчивость растений. Эти бактерии колонизируют поверхность корней или находятся в ризосфере растений, выполняют полезные для растений функции и поддерживают растения в условиях солевого стресса [12, с. 1799]. Ризобактерии способны стимулировать рост, увеличивать поглощение питательных веществ и повышать продуктивность культур. Они могут регулировать физиологию растений посредством производства фитогормонов, таких как ауксин, гиббереллины и цитокинины, повышать содержание биологического азота и биодоступность питательных веществ почвы, в частности фосфора [13, с. 1799]. Можно сказать, что ризобактерии способны повышать толерантность растений к засолению и смягчать вызванное солевым стрессом замедление роста. Поэтому применение таких бактерий перспективно.

Цель исследования – изучение влияния консорциума солетолерантных азотфиксирующих и фосфатмобилизующих бактерий на рост и развитие растений-фитомелиорантов в условиях солевого стресса и исследование совместного влияния растений-фитомелиорантов и консорциума бактерий на солевой режим почв.

Материалы и методы исследования

Опыты проводились в лабораторных и полевых условиях. В качестве растений-фитомелиорантов использовали донник желтый (*Melilotus officinalis* L.) сорт Алаула, люцерну (*Medicago sativa* L.) сорт Солеустойчивая и житняк (*Agropyron cristatum* L.). Эти сорта являются солеустойчивыми фитомелиорантами, адаптированными к почвенно-климатическим условиям, и они хорошо растут на засоленных почвах юго-востока Казахстана.

В опытах использовали два штамма бактерий: азотфиксирующий штамм Azp6/2 и фосфатмобилизующий штамм FT4. Бактерии были выделены из ризосферы донника, люцерны и житняка, растущих на сильнозасоленных почвах, изучены и являются солеустойчивыми.

Для изучения влияния бактерий на рост и развитие растений бактерии выращивали на жидких элективных средах: азотфикси-

рующие – на среде Эшби, фосфатмобилизующие – на среде Муромцева. Для создания консорциума суспензии бактерий смешивали в соотношении 1:1, затем суспензией бактерий обрабатывали семена из расчета 5 мл суспензии с титром 1×10^8 клеток на 1 г семян, длительность обработки 2 ч. Контролем служили семена без инокуляции, замоченные в стерильной водопроводной воде. Обработанные семена высевали в сосуды на 250 мл с засоленной почвой (300 г) по 1 г семян на сосуд. Для проведения опытов использовали сильнозасоленную почву с суммой солей водной вытяжки 3,62 %, значение pH 8,2. Длительность опыта составляла 30 суток, затем растения убирали, измеряли длину корней и стеблей, массу растений высушивали, доводили до постоянного веса и взвешивали. Эксперименты проводили в климатической камере (Memmert HPP 750 Constant Climate Chamber, Германия) со следующими параметрами: световой день – 9 ч, температура 25 °С, освещенность: холодный белый свет – 6500 К, теплый свет 2700 К; ночной режим – 15 ч; температура 21 °С, влажность – 65 %. Исследования проводили в трехкратной повторности.

Постановку полевых опытов проводили на юго-востоке Казахстана в Алматинской области в окрестностях пос. Ақший на деградированных засоленных пастбищах, координаты: 43°59'31" с. ш., 76°19'25" в. д., 507 м над уровнем моря. Площадь экспериментального участка составляла 0,5 га. Почва пастбища по типу отнесена к сероземам обыкновенным с сильным засолением, сумма солей водной вытяжки составляла 3,62 %, pH 8,2. Сбор проб почв проводили в соответствии с ГОСТ [14]. Для полевого эксперимента забор почв проводился в 25 точках. Среднюю пробу составляли из пяти точечных проб. Пробы почв отбирали осенью после укоса трав в 2023–2025 гг. Глубина забора почв составляла 0–30, 30–60 и 60–90 см. Отобранные образцы плотно упаковывали в полиэтиленовые пакеты и транспортировали в лабораторию. Анализ водной вытяжки и изучение минерального состава почв проводили в аккредитованной испытательной лаборатории ТОО «КазНИИ почвоведения и агрохимии им. У. У. Успанова» (г. Алматы, Казахстан). Весной 2023 г. был проведен подсев смеси семян донника, люцерны и житняка. Травы подсевали методом прямого посева в старовозрастную дернину. Перед посевом семена инокулировали бактериями из расчета 200 мл суспензии бактерий на гектарную норму семян: норма посева донника составляла 10–12 кг/га, люцерны – 16–20 кг/га, житняка – 8–10 кг/га.

Статистическую значимость полученных результатов анализировали с использованием пакета программ STATISTICA 10.0, ver. 6.0 [15]. Различия считались значимыми при $p < 0,05$, а значения представлены как среднее значение (M) ± стандартное отклонение (±SEM).

Результаты исследования и их обсуждение

Для применения бактерий в сельском хозяйстве важным показателем является их способность стимулировать рост растений на засоленных почвах. В этой связи провели изучение влияния солетолерантных бактерий на рост растений-фитомелиорантов донника, люцерны и житняка. Опыты проводили на засоленной почве, сумма солей водной вытяжки 3,62 %, рН 8,2. В опытах использовали консорциум из двух штаммов бактерий: азотфиксирующий штамм Azp6/2 и фосфатмобилизующий штамм FT4. Ранее было установлено, что эти штаммы обладали высокой солеустойчивостью, способностью активно фиксировать азот и повышать биодоступность фосфора при высоком солевом стрессе. Перед посевом семена растений инокулировали консорциумом бактерий. Полученные результаты представлены в табл. 1.

Из данных табл. 1 следует, что инокуляция семян консорциумом бактерий повышала их всхожесть, стимулировала рост и накопление зеленой массы растений при их выращивании на засоленной почве. Так, предпосевная обработка семян увеличила всхожесть донника до 69 % (контроль 38 %), житняка – до 75,2 % (контроль 65 %), люцерны – до 85 % (контроль 70 %). Также

установлено, что длина стеблей растений увеличилась более чем в 2,0 раза, длина корня – в 2,0–2,6 раз, сухая масса растения – в 2,3–2,6 раза, урожайность зеленой массы на сосуд увеличилась на 30–32 % по сравнению с контролем без инокуляции. Увеличение длины корней более чем вдвое свидетельствует об адаптации растений к засолению почвы. Можно сказать, что консорциум бактерий обладает большим потенциалом для поддержания роста растений-фитомелиорантов и повышения их выживания в стрессовых условиях на засоленных почвах.

Для мелиорации засоленных почв, повышения продуктивности и улучшения состояния травостоев пастбищ был проведен подсев растений-фитомелиорантов донника, люцерны и житняка в старовозрастную дернину. Проведенный анализ почвы пастбища показал, что степень засоленности почв была высокая, почва характеризовалась высокой щелочностью и низким плодородием. Все эти показатели неблагоприятны для роста и развития большинства пастбищных растений. Через два года (2025 г.) после постановки опыта (2023 г.) отмечено существенное изменение содержания водорастворимых солей в верхних горизонтах почвы пастбища. Данные по содержанию водорастворимых солей в почве пастбища приведены в табл. 2.

Из данных табл. 2 следует, что сумма солей водной вытяжки была очень высокой и составляла 3,62 %. Установлено, что при одновременном применении растений-фитомелиорантов и консорциума бактерий общая засоленность почвенного раствора в верхнем горизонте почвы (0–30 см) существенно снижалась.

Таблица 1

Влияние консорциума бактерий на рост и развитие культур на засоленной почве

Варианты опыта	Всхожесть, %	Длина стебля, см	Длина корня, см	Сухая масса растения, г	Урожайность зеленой массы, г/сосуд
Донник					
Контроль	38,1±1,0	10,6±0,1	11,3±0,1	0,5±0,01	9,7±0,1
Консорциум	69,2±1,2	23,2±0,2	24,2±0,2	1,3±0,02	12,6±0,1
Люцерна					
Контроль	70,1±1,3	10,6±0,1	11,6±0,1	0,8±0,02	15,8±0,1
Консорциум	85,3±1,4	23,9±0,2	29,9±0,2	1,9±0,02	20,9±0,3
Житняк					
Контроль	65,2±1,1	6,4±0,1	7,2±0,1	0,7±0,01	12,8±0,1
Консорциум	75,1±1,2	12,8±0,2	14,5±0,1	1,6±0,02	16,9±0,2
Уровень доверительной вероятности $p < 0,05$; $n = 3$					

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 2

Содержание водорастворимых солей в почве засоленного пастбища

Варианты опыта	Глубина, см	Сумма солей, %	Щелочность, общая в HCO_3^- , мг/экв	Ионы, мг/экв					
				Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+
Октябрь 2023 г.									
Контроль	0–30	3,62	0,42	6,45	57,3	21,4	1,3	14,14	4,36
	30–60	5,67	0,63	8,32	60,4	24,8	2,3	35,81	5,56
	60–90	7,36	0,82	8,65	65,8	29,3	3,7	40,22	4,93
Октябрь 2025 г.									
Контроль	0–30	3,55	0,44	5,45	58,2	20,8	1,2	14,57	4,21
	30–60	5,86	0,53	8,65	62,2	25,9	3,4	36,73	5,12
	60–90	7,82	0,72	9,05	66,7	30,6	4,2	42,24	4,08
Фитомелиоранты	0–30	2,33	0,31	0,18	21,3	2,46	0,3	16,67	0,52
	30–60	5,36	0,49	8,60	60,1	23,2	2,3	34,55	4,52
	60–90	6,93	0,70	8,55	64,5	29,7	4,5	40,08	4,14
Фитомелиоранты + консорциум	0–30	1,476	0,22	0,14	18,03	2,24	0,19	16,66	0,43
	30–60	5,23	0,51	8,62	58,2	23,9	2,1	33,17	4,46
	60–90	7,09	0,71	8,9	60,2	27,5	4,1	39,82	3,87

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Так, если в начале опыта сумма солей составляла 3,62 %, через 2 года она снизилась на 2,144 % и составила 1,476 %. Изучение солевого обмена почвы показало, что в формировании солевого режима верхних горизонтов почвы участвуют анионы Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , и катионы Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} . По присутствию и количеству водорастворимых солей в профиле почвы определен хлоридный тип засоления высокой степени, содержание ионов Na^+ составляло 14,14–16,66 мг/экв, что свидетельствует об осолонцевании. Изучение влияния растений-фитомелиорантов и консорциума бактерий на солевой обмен почвы показало существенное снижение содержания токсичных для растений ионов Cl^- и SO_4^{2-} в верхних горизонтах почвы. Известно, что хлоридное засоление особенно сильно действует на растения, несколько меньшая токсичность отмечается у сульфатного засоления. Показано, что под влиянием растений-фитомелиорантов и консорциума бактерий происходит снижение в верхних горизонтах почвы общей суммы солей и токсичных для растений ионов Cl^- и SO_4^{2-} , то есть отмечается процесс рассоления почв пастбищ. Это очень важно, так как именно эта глубина 0–30 см охватывает корневую зону большинства с/х культур и трав. Достоверного изменения засоленности почв при применении фитомелиорантов, фитомелиорантов и консорциума бактерий в более глубоких слоях почвы 30–60 см и 60–90 см авторами не выявлено.

лиорантов и консорциума бактерий в более глубоких слоях почвы 30–60 см и 60–90 см авторами не выявлено.

Заключение

В результате проведенных исследований авторами показано, что применение консорциума солетолерантных бактерий для инокуляции семян растений-фитомелиорантов повышает их всхожесть до 70–75 % и урожайность зеленой массы растений на 30–32 % на засоленной почве. Это свидетельствует о том, что азотфиксирующие и фосфатмобилизующие бактерии, входящие в состав консорциума, помогают растениям-фитомелиорантам более активно противостоять абиотическим стрессам, таким как засоленность, и стимулируют их рост и развитие. Видимо, это связано с тем, что азотфиксирующие бактерии снабжают растения дополнительным биологическим азотом за счет фиксации азота атмосферы, а фосфатмобилизующие бактерии, входящие в состав консорциума, переводят плохо растворимые фосфаты почвы в растворимые формы и повышают их биодоступность для растений. Также в исследовании авторов впервые показано, что одновременное применение растений-фитомелиорантов и консорциума солеустойчивых бактерий является весьма эффективным мелиоративным приемом в снижении засоленности

и активно влияет на процесс рассоления верхних горизонтов почвы. Этот процесс, возможно, связан с выносом подвижных солей с зеленой массой растений-фитомелиорантов при укосе пастбищ.

Таким образом, установлено что применение консорциума солеустойчивых азотфиксирующих и фосфатмобилизирующих бактерий повышает устойчивость растений-фитомелиорантов к солевому стрессу, о чем свидетельствует стимуляция их роста и повышение урожайности в условиях засоления. Также показано, что совместное использование растений-фитомелиорантов и консорциума солетолерантных бактерий является реальным путем снижения засоленности почв. Можно сказать, что разработанные мероприятия имеют большой потенциал для поддержания роста растений на засоленных почвах и являются реальным путем мелиорации деградированных почв, снижения засоленности и повышения урожайности сельскохозяйственных культур на засоленных почвах.

Список литературы

1. Tarolli P., Luo J., Park E., Barcaccia G., Masin R. Soil salinization in agriculture: Mitigation and adaptation strategies combining nature-based solutions and bioengineering // *iScience*. 2024. Vol. 27. Is. 2. P. 108830. DOI: 10.1016/j.isci.2024.108830.
2. Wuyun D., Bao J., Crusiol L. G. T., Wulan T. Generating salt-affected irrigated cropland map in an Arid and Semi-Arid region using multi-sensor remote sensing data // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. 23. P. 6010. DOI: 10.3390/rs14236010.
3. Atta K., Mondal S., Gorai S., Singh A. P., Kumari A., Ghosh T., Roy A., Hembram S. Impacts of salinity stress on crop plants: improving salt tolerance through genetic and molecular dissection // *Front. Plant Sci.* 2023. Vol. 14. P. e1241736. DOI: 10.3389/fpls.2023.1241736.
4. Abebe H., Tu Y. Impact of salt and alkali stress on forage biomass yield, nutritive value, and animal growth performance: A Comprehensive Review // *Grasses*. 2024. Vol. 3. Is. 4. P. 355–368. DOI: 10.3390/grasses3040026.
5. An C., Han F., Li N., Zheng J., Li M., Liu Y., Liu H. Improving physical and chemical properties of saline soils with fly ash saline and alkaline amendment materials // *Sustainability*. 2024. Vol. 16. Is. 8. P. 3216. DOI: 10.3390/su16083216.
6. Nainwal R. C., Chaurasiya P., Kumar A., Singh M., Singh D., Tewari S. K. Phytoremediation: A sustainable approach to combat soil salinity // *Adv. Environ. Eng. Res.* 2024. Vol. 5. Is. 2. P. e2402015. DOI: 10.21926/aeer.2402015.
7. Fu W., Yu J., Hu Q., Wang H., Zhao Y. Soil salt and water regulation in saline agriculture based on physical measures with model analysis // *Water*. 2024. Vol. 16. Is. 5. P. 719. DOI: 10.3390/w16050719.
8. Gairola S. U., Bahuguna R., Bhatt S. S. Native plant species: a tool for restoration of mined lands // *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 2023. Vol. 23. Is. 2. P. 1438–1448. DOI: 10.1007/s42729-023-01181-y.
9. Vlasenko M. V., Rybashlykova L. P., Turko S. Y. Restoration of degraded lands in the Arid zone of the European part of Russia by the method of phytomelioration // *Agriculture*. 2022. Vol. 12. Is. 3. P. 437. DOI: 10.3390/agriculture12030437.
10. Досжанова А. С., Оспанбаев Ж., Сембаева А. С., Майбасова А. С., Ибаш Н. Д., Жексемби Б. Агробиологические приемы восстановления плодородия деградированных орошаемых земель юго-востока Казахстана // *Почвоведение и агрохимия*. 2023 Т. 2. С. 14–28. DOI: 10.51886/1999-740X_2023_2_14.
11. Tucak M., Ravlic M., Horvat D., Cupic T. Improvement of forage nutritive quality of Alfalfa and Red Clover through plant breeding // *Agronomy*. 2021. Vol. 11. Is. 11. P. 2176. DOI: 10.3390/agronomy11112176.
12. Li Ch. Y., He R., Tian Ch. Y., Song J. Utilization of halophytes in saline agriculture and restoration of contaminated salinized soils from genes to ecosystem: Suaeda salsa as an example // *Marine Pollution Bulletin*. 2023. Vol. 197. P. e115728. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2023.115728.
13. Maciel-Rodriguez M., Moreno-Valencia F. D., Plascencia-Espinosa M. The role of plant growth-promoting bacteria in soil restoration: A strategy to promote agricultural sustainability // *Microorganisms*. 2025. Vol. 13. Is. 8. P. 1799. DOI: 10.3390/microorganisms13081799.
14. ГОСТ 17.4.4.02-2017. Охрана природы. Почвы. Методы отбора проб и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. М.: Стандартинформ, 2017. 10 с.
15. Боровиков В. П. Популярное введение в современный анализ данных и машинное обучение на STATISTICA. М.: Горячая линия – Телеком, 2024. 354 с. ISBN 978-5-9912-0738-6.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.



ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСА МАКРОФАГАЛЬНЫХ РЕАКЦИЙ, УЧАСТВУЮЩИХ В КЛЕТОЧНОЙ МУЛЬТИНУКЛЕАЦИИ, ИНТЕГРАЦИИ, ДИФФЕРЕНЦИРОВКЕ

Ильин Д. А. ORCID ID 0009-0006-5410-8393

*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр фундаментальной и трансляционной медицины»,
Новосибирск, Российская Федерация, e-mail: ilindenis.ilin@yandex.ru*

Распространение заболеваемости туберкулезом детерминирует актуальность исследования его патогенеза. Макрофагальная мультинуклеация, гранулемогенез имеют интегративное значение, обладая соответственно компенсаторным и приспособительным характером, и приспособительное значение имеет клеточная дифференцировка, что важно понимать при изучении патогенеза туберкулеза. Целью исследования являлось изучение характера осуществления комплекса макрофагальных реакций, имеющих значение в реализации клеточной мультинуклеации, интеграции и дифференцировки в условиях инфекционного гранулематоза. Материал исследования представлен культурами перитонеальных макрофагов интактных и инфицированных мышей. Методами исследования являлось определение относительной численности макрофагальных мультикарионов и макрофагов с признаками мультинуклеации, интеграции, дифференцировки. Результаты исследования указывают на существенное увеличение численности макрофагальных мультикарионов и макрофагов, участвующих в мультинуклеации, на два и три месяца наблюдения при существенном увеличении числа одноядерных и многоядерных макрофагов, реализующих интегративный процесс агломерации, соответственно на три и на два, три месяца наблюдения. Многоядерные макрофаги, вовлеченные в межклеточную интеграцию, в культурах всех групп встречались существенно чаще, чем одноядерные. Максимальная численность дифференцированных макрофагов была на три месяца наблюдения. В заключение можно заметить, что особенности мультинуклеации, интеграции, дифференцировки макрофагов следует учитывать при изучении роли макрофагальных функций в патогенезе туберкулеза, с которой связан прикладной аспект этой проблемы.

Ключевые слова: макрофаги, многоядерность, интегративная функция, клеточная дифференцировка, туберкулез

INVESTIGATION OF THE COMPLEX OF MACROPHAGE REACTIONS INVOLVED IN CELLULAR MULTINUCLEATION, INTEGRATION, DIFFERENTIATION

Ilin D. A. ORCID ID 0009-0006-5410-8393

*Federal State Budgetary Scientific Institution
“Federal Research Center of Fundamental and Translational Medicine”,
Novosibirsk, Russian Federation, e-mail: ilindenis.ilin@yandex.ru*

The spread of tuberculosis incidence determines the relevance of the study of its pathogenesis. Macrophage multinucleation and granulomogenesis are of integrative importance, having a compensatory and adaptive character, and cellular differentiation is of adaptive importance, which is important to understand when studying the pathogenesis of tuberculosis. The aim of the study was to study the nature of the implementation of a complex of macrophage reactions that are important in the implementation of cellular multinucleation, integration and differentiation in conditions of infectious granulomatosis. The research material is represented by cultures of peritoneal macrophages from intact and infected mice. The research methods were to determine the relative abundance of macrophage multicaryons and macrophages with signs of multinucleation, integration, and differentiation. The results of the study indicate a significant increase in the number of macrophage multicaryons and macrophages involved in multinucleation for two and three months of follow-up, with a significant increase in the number of mononuclear and multinucleated macrophages implementing the integrative agglomeration process, respectively, for three and two, three months of follow-up. Multinucleated macrophages involved in intercellular integration were significantly more common in cultures of all groups than mononuclear ones. The maximum number of differentiated macrophages was at three months of follow-up. In conclusion, it can be noted that the features of multinucleation, integration, and differentiation of macrophages should be taken into account when studying the role of macrophage functions in the pathogenesis of tuberculosis, which is associated with the applied aspect of this problem.

Keywords: macrophages, multinucleation, integrative function, cellular differentiation, tuberculosis

Введение

Известно, что туберкулез является глобальной проблемой [1]. Очевидно, что проблема туберкулеза включает различные аспекты [2-4]. В частности, внимания за-

служивают разнообразные формы туберкулеза [5-7]. В то же время рассмотрение эпидемиологических составляющих проблемы туберкулеза [1] относится к ее важным компонентам при обсуждении вопросов акту-

альности этой темы. Безусловно, следует учитывать распространенность туберкулеза. Тогда как уточнение патогенеза этого заболевания позволяет рассмотреть соответствующие значимые компоненты обсуждаемой проблемы. В частности, можно отметить информативные исследования, связанные с изучением патогенеза туберкулеза [8]. В то же время хотелось бы подчеркнуть потребность в дальнейшем проведении исследований патогенеза туберкулезного гранулематоза, что сопряжено с актуальностью изучения роли молекулярных и клеточных механизмов его развития.

Далее надлежит заметить, что макрофаги могут быть представлены в качестве их многоядерных производных, участвующих в развитии патологических процессов [9, с. 4]. Причем многоядерным макрофагам свойственен высокий уровень их цитофизиологического потенциала. В частности, многоядерные макрофаги имеют высокий провоспалительный, профиброзный и прореструктурирующий потенциал [10], чем детерминирована их патогенетическая роль в рассматриваемом аспекте. Наряду с этим известно, что в формировании полинуклеарных макрофагов задействованы молекулярные и субклеточные процессы фузии мононуклеаров и amitotического деления ядер [9, с. 4]. Роль регуляторных факторов и структурных компонентов цитоплазматической мембраны одновременно в процессах мультинуклеации и дифференцировки макрофагов является важным аспектом исследования сопряженности названных процессов. Можно отметить анализ экспрессии цитокинов и CD-рецепторов отдельных типов при оценке M1/M2 поляризации макрофагов [11]. В то же время проблема M1/M2 поляризации макрофагов имеет различные аспекты рассмотрения [12-14]. Возможно, что многоплановый характер изучения феномена M1/M2 поляризации макрофагов подчеркивает его фундаментальное значение.

Однако, продолжая обсуждение макрофагальной мультинуклеации путем осуществления реакций клеточной фузии, упомянем связь этой проблемы также с клеточной интеграцией, что является выражением интегративных клеточных процессов фундаментального свойства, вероятно, имеющих компенсаторно-приспособительный характер. В то же время гранулемогенез в качестве типического патологического процесса представляет собой пример реализации интегративных цитофизиологических реакций, в частности при рассмотрении этого вопроса на межклеточном уровне структурной организации, что имеет адаптивный аспект.

С научной точки зрения требуется оценка взаимосвязи мультинуклеации, интеграции, дифференцировки макрофагов, что обладает перспективой совместного исследования этих реакций макрофагов, включая их несущий высокий функциональный потенциал полинуклеаров, и служит пониманию патогенетической роли молекулярных и клеточных механизмов развития инфекционных гранулематозов. Наряду с оценкой молекулярных механизмов реализации обсуждаемых процессов, обусловленных специфическими функциями белков определенных типов, немалый интерес представляет исследование рассматриваемых макрофагальных реакций на клеточном уровне структурной организации вследствие их значения применительно к изучению настоящих аспектов.

При этом выделение информативных признаков учета цитоморфологических признаков реализации клеточных процессов содействует развитию методологии исследуемых макрофагальных реакций. Несомненной необходимостью является оценка интегративной функции макрофагов посредством их фузии и участия их в кластерогенезе, как первоначальном этапе формирования гистиоцитарных агломератов, что соответственно представлено процессами цитоконъюгации и гистиоцитарной агломерации. При этом с морфологической точки зрения процесс моноструктурности отражает приобретение клетками общих особенностей строения вследствие их структурной дифференцировки и осуществления ими интегративной и секреторной активности, имеющих соответствующие морфологические признаки.

Целью исследования являлось изучение характера осуществления комплекса макрофагальных реакций, имеющих значение в реализации клеточной мультинуклеации, интеграции и дифференцировки в условиях инфекционного гранулематоза.

Материалы и методы исследования

Материалы исследования представлены культурами перитонеальных макрофагов мышей линии C57Bl/6. Из них составляли контрольные и экспериментальные группы культур макрофагов, эксплантированных *in vitro* соответственно от интактных и БЦЖ-инфицированных мышей. Животных содержали в условиях свободного доступа к воде и пище. Методом дислокации шейных позвонков под эфирным наркозом реализовано выведение мышей из эксперимента. Периодами проведения эксперимента являлись 1, 2, 3 и 6 месяцев наблюдения. Перитонеальные клетки инкубировали *in vitro* в течение двух суток.

При помощи световой микроскопии осуществляли цитологический анализ препаратов клеточных культур. Проводили оценку относительной частоты встречаемости макрофагальных мультикарионов. Определяли величины показателей относительной численности макрофагов, имеющих признаки цитоконъюгации, гистиоцитарной агломерации и моноструктурности. К признакам моноструктурности макрофагов относили ряд цитоморфологических характеристик, указывающих на реализацию ими процесса структурной дифференцировки и функциональной активности. Определение показателей осуществления гистиоцитарной агломерации и моноструктурности макрофагов проведено отдельно в пределах субпопуляций их мононуклеарных и полиядерных клеток. Статистическое исследование результатов цитологического анализа клеточных культур заключалось в определении средней арифметической и стандартной ошибки средней при достоверности различий параметров при $p < 0,05$.

Результаты исследования и их обсуждение

В культурах экспериментальных групп по сравнению с контролем было зарегистрировано

выраженное прогрессивное возрастание относительной численности макрофагов с признаками цитоконъюгации с максимальным значением этого показателя на 2 и 3 месяца наблюдения и снижением его уровня на 6 месяцев по сравнению с предыдущим сроком, тогда как частота встречаемости мультикарионов имела максимальное значение на 2 и 3 месяца наблюдения, снижаясь практически до контрольного уровня на 6 месяцев наблюдения (табл. 1).

Учитывая роль цитоконъюгации в качестве процесса макрофагальной мультиядерности в указанных условиях, представляется логичным считать, что в периоды наиболее интенсивной реализации формирования многоядерных макрофагальных производных отмеченным механизмом клеточной мультиядерности был детерминирован этот процесс, высокая активность осуществления которого обусловлена ролью фузогенных цитокинов и молекул клеточной поверхности, вероятно, имеющих значительный уровень экспрессии у макрофагов в указанных условиях. Действительно, при БЦЖ-гранулематозе многоядерные макрофаги чаще экспрессируют, например, TNF- α и интегрин- $\beta 2$, по сравнению с мононуклеарными [10].

Таблица 1

Основные цитоморфологические показатели мультиядерности макрофагов в культурах перитонеальных клеток мышей линии C57Bl/6 (%)

Учитываемый показатель	Контроль	БЦЖ 1 месяц	БЦЖ 2 месяца	БЦЖ 3 месяца	БЦЖ 6 месяцев
Цитоконъюгация	1,0 \pm 0,2	5,3 \pm 0,4*	8,0 \pm 0,5*	8,0 \pm 0,4*	4,5 \pm 0,5*
Мультикарионы	6,0 \pm 0,4	7,0 \pm 0,4	11,0 \pm 0,5*	12,0 \pm 1,0*	5,0 \pm 0,4

Примечание: составлено автором на основе полученных данных в ходе исследования; * $p < 0,05$ по сравнению с контролем.

Таблица 2

Показатели интегративной и дифференцировочной способности одноядерных и многоядерных макрофагов в культурах перитонеальных клеток мышей линии C57Bl/6 (%)

Учитываемый показатель	Тип клеток	Контроль	БЦЖ 1 месяц	БЦЖ 2 месяца	БЦЖ 3 месяца	БЦЖ 6 месяцев
Гистиоцитарная агломерация	ОЯ	5,8 \pm 0,4	8,0 \pm 0,5*	7,8 \pm 0,4*	16,0 \pm 0,5*	6,0 \pm 0,5
	МЯ	19,0 \pm 1,0	31,3 \pm 1,0*	43,0 \pm 3,0*	46,0 \pm 2,0*	19,8 \pm 0,4
Моноструктурность	ОЯ	17,0 \pm 1,5	47,5 \pm 3,0*	48,0 \pm 4,0*	68,0 \pm 4,3*	37,5 \pm 3,0*
	МЯ	29,0 \pm 2,0	62,5 \pm 4,0*	64,0 \pm 4,2*	86,0 \pm 4,0*	48,0 \pm 3,0*

Примечание: составлено автором на основе полученных данных в ходе исследования; * $p < 0,05$ по сравнению с контролем; ОЯ – одноядерные макрофаги; МЯ – многоядерные макрофаги.

Показатели интегративной способности мононуклеарных и многоядерных макрофагов, определяемой на основании оценки степени интенсивности гистиоцитарной агрегации, имели существенные различия между собой в культурах контрольной и экспериментальных групп при максимальном значении этого параметра у мононуклеарных макрофагов на 3 месяца и у многоядерных макрофагов на 2 и 3 месяца наблюдения, тогда как величины параметров моноструктурности одноядерных и многоядерных макрофагов имели максимальный уровень на 3 месяца наблюдения (табл. 2).

Предположительно это могло быть обусловлено высоким уровнем цитофизиологической активности многоядерных макрофагов в отношении продукции ряда цитокинов с хемотрактантным эффектом, играющих роль в реализации кластерогенеза, имеющего интегративный характер, а также большой способностью макрофагов в патологических условиях к реализации клеточной дифференцировки. Вследствие высокого уровня функциональной способности макрофагов в отношении их провоспалительной активности [10] это представляется вероятным. Отмеченный характер реализации дифференцировки макрофагов был обусловлен, вероятно, возрастанием потребности в осуществлении этого процесса, что необходимо в обсуждаемых патологических условиях ввиду увеличения функционального потенциала макрофагов в отношении в том числе их интегративной и секреторной функций. В этом плане следует учитывать тот факт, что многоядерные макрофаги играют роль в гранулемогенезе – основном процессе развития туберкулезного гранулематоза, имея высокий функциональный потенциал в отношении их провоспалительной, профиброзной и продеструктивной активности [10].

Таким образом, можно заметить, что в условиях БЦЖ-гранулематоза наблюдалось прогрессивное возрастание интенсивности процессов цитоконъюгации, детерминирующей формирование мультикарионов, а также гистиоцитарной агрегации и моноструктурности. Носящие интегративный характер процессы цитоконъюгации и гистиоцитарной агрегации имеют соответственно компенсаторный и приспособительный характер, содействуя, соответственно, образованию макрофагальных мультикарионов, обладающих выраженным цитофизиологическим потенциалом, и обуславливая реализацию гранулемогенеза. Причем целесообразно отметить, что формирование полинуклеарных макрофагов указывает на осуществление компенсатор-

но-приспособительных реакций [15] и многоядерные макрофаги в условиях БЦЖ-гранулематоза имеют высокий уровень функционального потенциала [10].

Многоядерные макрофаги, по сравнению с одноядерными, имеют большую способность к интегративному процессу гистиоцитарной агрегации, высокие значения показателя которого отмечены не только в основной период наблюдения, но и в предшествующий ему срок у мультикарионов ввиду их большого функционального потенциала. Приспособительное значение дифференцировки макрофагов, в морфологическом смысле выраженное феноменом моноструктурности, характеризуется большей тенденцией к реализации у мультикарионов из-за их высокой функциональной активности. Здесь небезы-interесно указать, что отмечена взаимосвязь компенсаторно-приспособительных процессов, а также структурной и функциональной дифференцировки многоядерных макрофагов, причем последняя связана с феноменом их поляризации, что содействует пониманию патогенеза туберкулезного гранулематоза [15].

Процесс цитоконъюгации является одновременно отражением реакций интеграции и дифференцировки макрофагов, приобретающих свойство многоядерности, что в первом случае несет компенсаторное, а во втором – приспособительное значение, с которым связан фундаментальный характер обсуждаемых процессов. Интегративную и дифференцировочную направленность имеют также соответственно реакции гистиоцитарной агрегации и явление моноструктурности макрофагов. В этой связи интерес представляют следующие факты. Например, к приспособительным процессам на клеточном уровне относится клеточная фузия, тогда как на тканевом уровне осуществлению компенсаторных реакций содействует возрастание количества полинуклеаров, что обусловлено особенностями клеточной дифференцировки [15].

Учитывая вышеизложенные факты, считаем, что перспективным подходом с точки зрения теоретических и прикладных аспектов настоящей темы представляется детальный анализ специфики реализации вышеуказанных гистиоцитарных реакций интегративного и дифференцировочного плана на основе результатов иммуноцитохимического исследования особенностей экспрессии регуляторных и структурных белков, участвующих в процессах макрофагальной конъюгации, агрегации и обуславливающих особенности функциональной клеточной дифференцировки. В частности, интерес представляет оценка экспрессии у ма-

крофагов цитокинов и молекул клеточной поверхности, обеспечивающих реализацию клеточного слияния [10].

Это также справедливо в отношении исследования дифференцировки макрофагов. Например, экспрессия цитокинов и CD-рецепторов учитывается при изучении M1/M2 поляризации макрофагов [11]. Если принять во внимание факт участия регуляторных и структурных белков одновременно в обеспечении исполнения интегративных и дифференцировочных процессов у макрофагов, очевидным становится теоретическое значение установления взаимосвязи между этими фундаментальными процессами, что служит их систематизации. Основным смыслом реализации ряда клеточных реакций, предопределяющих специфику осуществления макрофагальной мультинуклеации, интеграции и дифференцировки в рассматриваемых условиях патологического процесса, несущего динамический характер, вероятно, непосредственно детерминирован ролью этих цитоллярных реакций в механизмах его развития.

Клеточная мультинуклеация, содействующая приобретению высокой функциональной способности формирующимися полинуклеарными макрофагами, обуславливающая их роль в развитии очагов хронического воспаления, сопряжена с реализацией процессов клеточной дифференцировки, наблюдаемой на нескольких уровнях структурной организации, и связана с понятием функциональной дифференцировки этих клеток, предполагающим наличие определенной специфики реализации ими их цитофизиологического потенциала. Функциональная дифференцировка многоядерных макрофагов связана с процессом их поляризации, что способствует пониманию патогенеза туберкулезного гранулематоза [15].

Было бы логичным принимать, что функциональная дифференцировка макрофагов имеет своим выражением приобретение характерных для них в патологических условиях особенностей экспрессии молекул клеточной поверхности и продукции медиаторов. В этой связи можно отметить, что макрофаги в условиях экспериментального БЦЖ-гранулематоза имеют отличия от контроля в плане экспрессии отдельных типов CD-рецепторов и цитокинов и, кроме того, различаются по этим особенностям между собой в зависимости от их классов ядерности [11]. Упомянутый аспект относится к феномену M1/M2 поляризации макрофагов и их многоядерных производных [11], имеющих высокий цитофизиологический потенциал, чем детерминирован патогенетиче-

ский смысл взаимосвязи дифференцировки клеток и их функциональной способности.

В то же время феномен структурной дифференцировки макрофагов позволяет говорить о наличии его роли в морфогенезе клеточных типов, что затрагивает комплекс цитоморфологических преобразований, наблюдаемых у макрофагов и их полиядерных производных. Например, многоядерные макрофаги отдельных морфологических типов различаются по характеру расположения ядер [9, с. 16-17], чем, возможно, демонстрируются особенности реализации процессов дифференцировки этих клеток. Причем особенности локализации клеточных ядер связаны с перестройками элементов цитоскелета [9, с. 18]. Представляется логичным предположение о том, что с процессами дифференцировки макрофагов и их мультинуклеарных форм сопряжено образование комплекса различных цитофизиологических видов этих клеток.

Под ними следует понимать наличие, например, макрофагов с преобладающей провоспалительной, профиброзной или прореструктивной функцией. Поскольку макрофаги могут обладать высоким функциональным потенциалом в отношении их провоспалительной, профиброзной, прореструктивной активности [10], то это обеспечивает выполнение этими клетками соответствующих функций. Представляется возможным систематизировать макрофагальные типы по их доминирующей роли в клеточных реакциях, носящих характер инициации и регуляции молекулярных, цитоллярных процессов, и по выполнении ими их эффекторной функции.

По мнению автора, прикладная обусловленность этих аспектов связана с возможностью изучения клеточных процессов, определяющих приобретение макрофагами высокого уровня их цитофизиологического потенциала вследствие их мультинуклеации и детерминирующей интегративную функцию и дифференцировку макрофагов, что может быть положено в основу методов цитологической диагностики, учитывающих уровни цитофизиологической способности макрофагов и характер их дифференцировки. Научное значение установленных фактов заключается в целесообразности их использования при систематизации процессов макрофагальной мультинуклеации, интеграции и дифференцировки и при определении обусловленности этих клеточных реакций реализацией компенсаторно-приспособительных процессов. С точки зрения автора это необходимо ввиду взаимосвязи компенсаторно-приспособительных процессов, структурной и функциональной дифференцировки макрофагов [15].

Заключение

Подводя итоги рассмотрения аспектов изучения ряда клеточных механизмов, обеспечивающих осуществление процессов мультинуклеации, интеграции и дифференцировки макрофагов при БЦЖ-гранулематозе, следует отметить, что в указанных патологических условиях существенно возрастает интенсивность процесса цитоконъюгации макрофагов, детерминирующей реализацию их мультинуклеации, в результате которой они приобретают высокий цитофизиологический потенциал, с чем связана большая активность интегративных и дифференцировочных процессов у многоядерных макрофагов.

При изучении клеточных механизмов туберкулезного гранулематоза важно понимать, каким образом участие макрофагов в интегративных клеточных интеракциях обеспечивает их мультинуклеацию и гранулемогенез, осуществляющиеся соответственно на клеточном и тканевом уровнях структурной организации, имея в первом случае несомненное компенсаторное значение, являя пример компенсаторной гипертрофии клеток, участвующих в типическом патологическом процессе, к которому относится хроническое воспаление, тогда как во втором случае речь может идти о развитии приспособительного процесса, связанного с образованием гранул в тканях органов. Феномен макрофагальной дифференцировки представляет проявление приспособительного процесса, имеющего субклеточный и клеточный механизмы реализации. Изучение этих процессов необходимо для разработки их классификации, что определяет теоретическое значение исследований соответствующих макрофагальных реакций, характер реализации которых должен учитываться при определении принципов использования перспективных методов цитологической диагностики и контроля эффективности терапевтической коррекции туберкулезного гранулематоза, что обуславливает прикладной аспект обсуждаемых вопросов.

Список литературы

1. Zhang T., Zhang J., Wei L., Liang H., Zhang J., Shi D., Wang Z. The global, regional, and national burden of tuberculosis in 204 countries and territories, 1990-2019 // *Journal of*

Infection and Public Health. 2023. Vol. 16. Is. 3. P. 368-375. DOI: 10.1016/j.jiph.2023.01.014.

2. Singh Dewhare S. Drug resistant tuberculosis: Current scenario and impending challenges // *The Indian Journal of Tuberculosis*. 2022. Vol. 69. Is. 2. P. 227-233. DOI: 10.1016/j.ijtb.2021.04.008.

3. Sundaram K., Vajravelu L. K. Tuberculosis and its clinical consequences on Women's health // *The Indian Journal of Tuberculosis*. 2024. Vol. 71. Is. 2. P. 195-203. DOI: 10.1016/j.ijtb.2023.06.002.

4. Swaminathan N., Perloff S. R., Zuckerman J. M. Prevention of Mycobacterium tuberculosis Transmission in Health Care Settings // *Infectious Disease Clinics of North America*. 2021. Vol. 35. Is. 4. P. 1013-1025. DOI: 10.1016/j.idc.2021.07.003.

5. Dhiman R., Lakra S., Panda P. K., Hemachandran N., Sharma S., Saxena R. Neuro-ophthalmic manifestations of tuberculosis // *Eye (London)*. 2022. Vol. 36. Is. 1. P. 15-28. DOI: 10.1038/s41433-021-01619-6.

6. Figueiredo A. A., Lopes H. E., Barreto A. A., Fanni V. S. S., Bastos J. M. Netto. Prostate Tuberculosis: six forms of clinical presentation // *International Brazilian Journal of Urology*. 2024. Vol. 50. Is. 1. P. 80-86. DOI: 10.1590/S1677-5538.IBJU.2023.0299.

7. Gramminger C., Biedermann T. Recognising cutaneous tuberculosis // *Journal der Deutschen Dermatologischen Gesellschaft*. 2025. Vol. 23. Is. 7. P. 793-802. DOI: 10.1111/ddg.15674.

8. Squeglia F., Ruggiero A., Berisio R. Collagen degradation in tuberculosis pathogenesis: the biochemical consequences of hosting an undesired guest // *The Biochemical Journal*. 2018. Vol. 475. Is. 19. P. 3123-3140. DOI: 10.1042/BCJ20180482.

9. Ильин Д. А. Многоядерные макрофаги. Новосибирск: Наука, 2011. 56 с. ISBN: 978-5-02-018974-4.

10. Ильин Д. А. Исследование in vitro экспрессии TNF- α , IFN- γ и интегринов- β 1 и - β 2 у многоядерных макрофагов БЦЖ-инфицированных мышей // *Современные проблемы науки и образования*. 2024. № 2. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=33355> (дата обращения: 29.03.2026). DOI: 10.17513/spno.33355.

11. Il'in D. A., Shkurupy V. A. The In Vitro M1/M2 Polarization of Macrophages of BCG-Infected Mice // *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*. 2020. Vol. 169. Is. 4. P. 467-469. DOI: 10.1007/s10517-020-04910-w.

12. Yuan J., Lin F., Chen L., Chen W., Pan X., Bai Y., Cai Y., Lu H. Lipoxin A4 regulates M1/M2 macrophage polarization via FPR2-IRF pathway // *Inflammopharmacology*. 2022. Vol. 30. Is. 2. P. 487-498. DOI: 10.1007/s10787-022-00942-y.

13. Yuda M., Aizawa S., Tsuboi I., Hirabayashi Y., Harada T., Hino H., Hirai S. Imbalanced M1 and M2 Macrophage Polarization in Bone Marrow Provokes Impairment of the Hematopoietic Microenvironment in a Mouse Model of Hemophagocytic Lymphohistiocytosis // *Biological and Pharmaceutical Bulletin*. 2022. Vol. 45. Is. 11. P.1602-1608. DOI: 10.1248/bpb.b22-00108.

14. Zhang W., Guan N., Zhang X., Liu Y., Gao X., Wang L. Study on the imbalance of M1/M2 macrophage polarization in severe chronic periodontitis // *Technology and Health Care*. 2023. Vol. 31. Is. 1. P. 117-124. DOI: 10.3233/THC-220092.

15. Ильин Д. А. Взаимосвязь макрофагальной мультинуклеации и реализации клеточных процессов и дифференцировки // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2025. № 1. С. 36-41. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=13689> (дата обращения: 29.03.2026). DOI: 10.17513/mjpf.13689.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.



ПОИСК ПРОТОТИПА И КАСКАДНОЕ КОПИРОВАНИЕ В РАДИОЧАСТОТНОМ РЕЕСТРЕ: ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАПРОСОВ

¹Аданбаев А. М. ORCID ID 0009-0005-5888-1220,

²Сагымбаев А. А. ORCID ID 0009-0009-6177-0627

¹ *Киргизско-Турецкий университет «Манас», Бишкек,
Киргизская Республика, e-mail: aybek@manas.edu.kg;*

² *Киргизский государственный технический университет
им. И. Раззакова, Бишкек, Киргизская Республика*

Ведение радиочастотного реестра включает повторяющиеся операции, при которых оператору приходится заново вводить уже известные сведения. Цель статьи – формализовать механизм поиска прототипа и каскадного копирования типовых записей, а также экспериментально оценить производительность поиска и эффект оптимизации запроса. Исследование выполнено на агрегированных данных действующего радиочастотного реестра Киргизской Республики объёмом 667 193 записи в среде реляционной системы управления базами данных; использовались замеры времени выполнения запросов, анализ фактического плана выполнения и статистическая оценка доверительного интервала. Показано, что последовательное уточнение критериев сокращает множество записей-кандидатов от полного объёма реестра до нуля при времени отклика в пределах нескольких десятков миллисекунд. Анализ плана выполнения выявил причину аномальной задержки в режиме обзорного просмотра: отсутствие индекса по полю регионального кода приводило к полному сканированию промежуточной таблицы и многократному запуску зависимого подзапроса. Добавление индекса устранило полное сканирование и обеспечило ускорение в 6,2 раза, подтверждённое измерениями времени выполнения и анализом плана запроса. Обобщение результата ограничено системами со сходной структурой запроса: категориальным фильтром верхнего уровня, зависимым подзапросом и отсутствующим индексом по полю фильтрации. Подсчёт атрибутов схемы показывает, что каскадное копирование сокращает число потенциально заполняемых оператором полей примерно с 50 до 15; фактическое время работы оператора и частота ошибок ввода в данной статье не измерялись.

Ключевые слова: радиочастотный реестр, управление спектром, поиск прототипа, копирование записей, оптимизация запросов, индексирование базы данных, зависимый подзапрос

PROTOTYPE SEARCH AND CASCADING COPY IN A RADIO FREQUENCY REGISTER: PERFORMANCE AND QUERY OPTIMISATION

¹Adanbaev A. M. ORCID ID 0009-0005-5888-1220,

²Sagymbaev A. A. ORCID ID 0009-0009-6177-0627

¹ *Kyrgyz-Turkish Manas University, Bishkek, Kyrgyz Republic,
e-mail: aybek@manas.edu.kg;*

² *Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov,
Bishkek, Kyrgyz Republic*

Maintenance of a radio frequency register includes recurring operations in which operators have to re-enter information that is already known. The aim of the paper is to formalise a prototype search and cascading copy mechanism for typical records and to experimentally evaluate search performance and the effect of query optimisation. The study was conducted on aggregated data from the active radio frequency register of the Kyrgyz Republic containing 667,193 records in a relational database management system environment; query execution time measurements, actual execution-plan analysis and statistical confidence interval estimation were used. The results show that successive refinement of search criteria reduces the candidate set from the full register volume to zero while keeping response times within a few tens of milliseconds. Execution-plan analysis identified the cause of the anomalous delay in the overview mode: the absence of an index on the regional code field led to a full scan of the intermediate table and repeated execution of a dependent subquery. Adding the index removed the full scan and provided a 6.2-fold speedup, confirmed by execution time measurements and query-plan analysis. Generalisation of the result is limited to systems with a similar query structure: an upper-level categorical filter, a dependent subquery and the absence of an index on the filtering field. A schema-level attribute count shows that cascading copy reduces the number of fields potentially filled in by an operator from about 50 to about 15; the actual operator working time and input error rate were not measured in this paper.

Keywords: radio frequency register, spectrum management, prototype search, record copying, database query optimisation, database indexing, dependent subquery

Введение

Автоматизированные системы управления радиочастотным спектром (АИС РЧС) являются базовым инструментом национальных регуляторов в области электросвязи. Рекомендация ITU-R SM.1370-2 задаёт основные требования к таким системам: состав данных, поддерживаемые функции и возможность выборки по диапазону частот, географической области, идентификатору записи и статусу лицензии [1; 2]. Документы МСЭ также рекомендуют использовать компьютеризированные методы управления спектром и соответствующие модели данных [3; 4]. Иными словами, современная АИС РЧС должна не только хранить сведения о лицензиатах, объектах размещения радиоэлектронных средств и параметрах частотных присвоений, но и обеспечивать удобную работу с этими данными [4].

Практика эксплуатации государственного реестра РЧС Киргизской Республики показывает, что значительная часть новых частотных присвоений оформляется для объектов, технические параметры которых либо совпадают с уже зарегистрированными, либо отличаются несущественно. В литературе по цифровизации государственных услуг повторный ввод данных и недостаточная стандартизация процедур рассматриваются как факторы, способные увеличивать административную нагрузку и снижать удобство работы с цифровыми сервисами [5–7]. Для систем государственного управления, ориентированных на интеграцию электронных услуг, отдельное значение имеют согласованная работа информационных контуров и межведомственное взаимодействие [8]. Принципы повторного использования уже имеющихся сведений и однократного предоставления данных рассматриваются как важные направления ограничения избыточного ввода и дублирования сведений [9; 10]. В настоящей статье указанные источники используются как общий контекст постановки задачи, а не как прямое доказательство эффективности каскадного копирования в радиочастотном реестре.

Несмотря на наличие международных руководств, в доступных рецензируемых публикациях по автоматизированному контролю назначения радиочастот и управлению ресурсами радиосистем ограниченно представлены прикладные сценарии ведения национального радиочастотного реестра, в которых поиск прототипа, создание записи на основе копии и анализ производительности рассматриваются совместно [11; 12]. В настоящей статье ко-

личественно оцениваются производительность поиска и эффект индексирования, а каскадное копирование рассматривается на уровне структуры создаваемых записей и числа потенциально заполняемых полей. Механизмы экспорта и печати описываются как элементы рабочего контура, но их производительность отдельно не измеряется. В этой связи статья вносит следующий вклад: 1) экспериментально измеряет производительность многокритериального поиска; 2) с помощью EXPLAIN ANALYZE диагностирует причину деградации режима byOne; 3) показывает эффект индексирования – ускорение в 6,2 раза при 95%-ном доверительном интервале 5,69–7,16 раза; 4) формулирует условия, при которых аналогичный эффект может ожидать в системах сходной архитектуры, без утверждения его универсальной воспроизводимости.

Цель исследования – формализовать механизм поиска прототипа и каскадного копирования при автоматизированном ведении радиочастотного реестра, экспериментально оценить производительность поиска и эффект индексирования, а также оценить каскадное копирование на уровне числа потенциально заполняемых оператором полей. Количественная оценка времени работы операторов, частоты ошибок ввода, а также производительности экспорта и подготовки печатных форм в задачи настоящего исследования не входила. Ниже приведены материалы исследования и использованные методы.

Материалы и методы исследования

Материал исследования включает три компонента: а) агрегированные данные действующего радиочастотного реестра объёмом 667 193 записи (MySQL 8.0.45; без учёта записей, помеченных через поле `addflag`); б) архивные данные операционного журнала предшествующей системы за период с июня 2000 г. по октябрь 2014 г.; в) программную реализацию механизмов АИС управления РЧС КР. Свидетельство о регистрации программы [13] используется только для идентификации программного решения как объекта исследования и не рассматривается как доказательство научной эффективности предложенных механизмов.

С точки зрения предметной области трёхуровневая организация сведений о лицензиате, объекте размещения радиоэлектронных средств и частотном присвоении согласуется с общей логикой данных автоматизированных систем управления радиочастотным спектром [1–3]. В исследуемой

реализации реестр построен на реляционной базе данных и включает три связанные таблицы. Таблица Owner описывает лицензиата и содержит около 20 атрибутов; поле area включает 9 целочисленных кодов (7 областей КР, а также Бишкек и Ош как города республиканского значения), а поле state хранит коды статуса лицензии. Таблица Site описывает объект размещения РЭС и содержит около 20 технических атрибутов; в ней 271 453 строки. Таблица Freq фиксирует частотное присвоение, содержит около 10 атрибутов, а номинал частоты хранится в кГц. Полное пространство поиска задаётся как

$$F = \text{Owner} \bowtie \text{Site} \bowtie \text{Freq}, |F| = 667\,193,$$

где \bowtie обозначает соединение таблиц, то есть формирование набора строк с совпадающими значениями в связанных полях. Указанные значения являются агрегированными внутренними данными действующего реестра.

Метод 1. Экспериментальные замеры ($n=5$, тёплый кеш). SQL-запрос выполнялся пять раз подряд в одной сессии, после чего фиксировалось чистое время его выполнения (execution time). Затем вычислялись среднее значение \bar{t} , стандартное отклонение s и 95%-ный доверительный интервал: $\pm 2,776 \cdot s / \sqrt{5}$. Замеры проводились при тёплом кеше (warm cache), то есть в ситуации, когда рабочие данные уже находятся в оперативном буфере СУБД после предшествующих обращений. Такой режим соответствует типичной непрерывной работе оператора. Для полного реестра (сценарий 0) приведён одиночный ориентировочный замер (\dagger), поэтому доверительный интервал для него не рассчитывался.

Метод 2. Анализ плана запроса (EXPLAIN ANALYZE). Этот метод использовался для получения фактического плана выполнения запроса с реальными значениями rows – числа строк, обработанных на каждом шаге, и loops – числа повторных запусков соответствующего шага – до и после оптимизации.

Метод 3. Оценка доверительного интервала для коэффициента ускорения методом бутстрэпа. Бутстрэп – непараметрический метод статистического оценивания, при котором из исходных данных многократно формируются псевдовыборки путём случайного выбора с возвращением. Распределение интересующей статистики по этим итерациям используется для вычисления доверительного интервала. Серия «до» была получена при $\text{nominal} = f_{\text{test}}$, серия «после» – при $\text{nominal} = f_{\text{oper}}$, то есть при операционном номинале

с ненулевым числом присвоений в регионе. Конкретные значения номиналов не раскрываются, поскольку для цели данного эксперимента существенны не предметные свойства частоты, а фактическая вычислительная нагрузка запроса. Эти два номинала не рассматриваются как полностью эквивалентные по предметному содержанию. Их сопоставление используется только для оценки изменения плана выполнения после создания индекса, поскольку EXPLAIN ANALYZE в обоих случаях показывает одинаковые ключевые параметры: соединение Owner \bowtie Site даёт 13 105 строк, а зависимый подзапрос выполняется 25 422 раза. Для оценки коэффициента ускорения было выполнено $B=100\,000$ псевдовыборок с возвращением по двум наборам замеров: до оптимизации {4172; 3137; 3134; 3113; 3038} мс и после оптимизации {557; 526; 510; 556; 490} мс. Для каждой итерации рассчитывалось отношение средних значений $\bar{t}_{\text{до}} / \bar{t}_{\text{после}}$; 95%-ный ДИ определялся по 2,5-му и 97,5-му перцентилям и составил 5,69–7,16 раза, медиана – 6,22 раза.

Метод 4. Подсчёт атрибутов схемы базы данных. Для приближённой структурной оценки подсчитывалось число атрибутов (DESCRIBE Owner/Site/Freq), которые оператор потенциально заполняет при ручном создании записи и при использовании операции Copy. Этот метод оценивает только сокращение числа полей ввода и не является хронометражем работы оператора или измерением частоты ошибок ввода. Ниже последовательно описаны механизмы АИС управления РЧС КР, ставшие объектом экспериментальной оценки.

Механизм многокритериального поиска

Механизм поиска построен на принципе последовательного сужения выборки: каждый новый критерий применяется не ко всему реестру заново, а к уже отфильтрованному множеству записей. Формально это можно описать так: пусть $P = \{p_1, \dots, p_n\}$ – полное множество доступных критериев, а $A \subseteq P$ – подмножество критериев, активированных оператором. Тогда условие выборки $W(A) = \bigwedge \{p_i | p_i \in A\}$ представляет собой логическое И всех активных условий, а результирующее множество $F'(A)$ не возрастает при расширении A . Практически это означает, что каждый новый критерий либо сокращает число кандидатов, либо оставляет его прежним, но не расширяет. Используемые критерии охватывают административные, пространственные, технические и регистрационные параметры трёх уровней (табл. 1) [1; 4].

Таблица 1

Критерии поиска в реестре РЧС КР

Ур.	Критерий	Поле БД	Тип сравнения
1	Идентификатор владельца	owner.ID	Точное =
1	Наименование организации	owner.Name	Подстрочный LIKE
1	Регион КР (9 кодов)	owner.area (int)	По перечислению
1	Статус лицензии	owner.state (int)	По перечислению
1	Номер счёта / лицензии	owner.schet / LICNUMnum	Точное =
2	Наименование объекта	site.SiteName	Подстрочный LIKE
2	Широта / долгота (°, ', ")	site.latitude/longitude 0/1/2	Точное = по компонентам
3	Номинал частоты (МГц → кГц)	freq.nominal (double)	Точное =, конверсия единиц
3	Полоса частот	freq.band	Точное =

Примечание: составлено авторами. Поле area: 9 кодов = 7 областей КР + Бишкек + Ош; поле state – целочисленные коды; номинал – в кГц.

Режим быстрого обзора byOne («по одной записи на объект») предназначен для компактного просмотра реестра: вместо вывода всех частотных присвоений система показывает только первое найденное присвоение для каждого объекта. Технически режим реализован через подзапрос SELECT f2.ID FROM Freq f2 WHERE f2.IDsite=s.ID LIMIT 1. В нормальной работе byOne используется без привязки к конкретной частоте; нагрузочные замеры с фильтром по номиналу проводились только для анализа плана выполнения. При активном фильтре по номиналу запрос может возвращать 0 строк, поскольку первое найденное присвоение не всегда совпадает с заданным значением. Однако число запусков подзапроса определяется количеством объектов в регионе, а не числом строк в итоговой выборке, поэтому данный режим использовался для анализа вычислительной нагрузки, а не пользовательской скорости просмотра.

Механизм каскадного копирования типовой записи

Механизм поиска прототипа служит отправной точкой для операции каскадного копирования. Операция работает с тремя уровнями данных: лицензиат, объект размещения радиоэлектронных средств и частотное присвоение, что соответствует общей логике хранения и выборки сведений в автоматизированных системах управления радиочастотным спектром [1]. Формально операция Copy(ow_id) порождает дерево $ow' \rightarrow \{s'\} \rightarrow \{f'_{ij}\}$: новый Owner наследует технические поля прототипа, каждый Site воспроизводится с новым IDowner, а каждая Freq – с новыми IDsite и IDowner. После создания каждой записи Freq вызы-

вается integrityService.logInsertById(), который вычисляет HMAC-SHA-256 для канонического представления данных записи и сохраняет результат в журнале целостности. В данной статье журналирование рассматривается как механизм фиксации создаваемых записей и контроля последующей целостности, но не как доказательство полной атомарности операции Copy при сбоях. Технически операция реализована как каскад JDBC-вставок; перевод всей процедуры Owner→Site→Freq в явную ACID-транзакцию рассматривается как задача следующей версии. Следовательно, безопасность Copy при частичных сбоях не является как достигнутый результат настоящего исследования.

Механизмы экспорта и подготовки печатных форм

Отобранные и скопированные записи могут передаваться во внешние форматы с помощью механизмов экспорта и подготовки печатных форм. Экспорт реализован как выгрузка фильтрованной выборки F' в формат XLSX без повторного ввода параметров запроса. Подсистема печати формирует PDF-документ после проверки целостности выбранных записей; при выявлении несоответствия операция блокируется. Для сформированного документа дополнительно вычисляется контрольная метка на основе SHA-256. В настоящей статье эти функции описываются только как элементы рабочего контура системы. Их влияние на производительность работы оператора количественно не измерялось, поэтому далее основное внимание уделено поиску, плану выполнения запроса и эффекту индексирования.

Результаты исследования и их обсуждение

Производительность механизма поиска представлена в таблице 2. Последовательное добавление предикатов монотонно сокращает выборку. Нулевое число записей в сценариях 4–5 не является ошибкой: оно показывает, что для данной комбинации условий в реестре просто нет совпадений. В этом смысле нулевой результат тоже является содержательно значимым, поскольку демонстрирует предельную избирательность механизма поиска.

Диагностика режима byOne и эксперимент по оптимизации. До оптимизации среднее время выполнения составляло $\bar{t}=3\,318,8$ мс (95%-ный ДИ: $\pm 594,2$ мс). Сокращённый план EXPLAIN ANALYZE до оптимизации показал три ключевых признака: полное сканирование таблицы Site (271 453 строки), формирование соединения Owner \bowtie Site объёмом 13 105 строк и 25 422 итерации зависимого подзапроса.

Причина задержки связана с порядком доступа к данным. Из-за отсутствия индекса на Owner.area MySQL начинает выполнение с полного сканирования Site (271 453 строки), затем для каждой строки Site обращается к Owner и проверяет условие area=2; в результате соединение Owner \bowtie Site даёт 13 105 строк. Зависимый подзапрос запускается 25 422 раза, что зафиксировано в поле loops плана EXPLAIN ANALYZE. В литературе по коррелированным подзапросам отмечается, что та-

кая стратегия может приводить к повторному выполнению подзапроса для кортежей родительского запроса [14], а исследования сложных запросов показывают зависимость времени выполнения от структуры запроса, индексирования и оптимизации [15]. В настоящей работе конкретный эффект индекса Owner.area определяется фактическим планом EXPLAIN ANALYZE и собственными замерами.

Репрезентативность замеров и эксперимент после оптимизации. После создания индекса (CREATE INDEX idx_owner_area ON Owner(area)) режим byOne был протестирован на сценарии с nominal=f_oper – операционным номиналом, для которого в Чуйском регионе зарегистрировано $O(10^2)$ объектов. Это подтверждено запросом COUNT(DISTINCT Site.ID); конкретное значение f_oper не публикуется. Нулевое число строк в результате byOne объясняется тем, что первая запись Freq по LIMIT 1 для конкретного объекта может не совпасть с запрошенным номиналом. Однако EXPLAIN ANALYZE показывает, что соединение Owner \bowtie Site по-прежнему даёт 13 105 строк, а подзапрос выполняется 25 422 раза. Следовательно, измерение отражает объём вычислительной работы данного плана запроса. При этом nominal=f_test и nominal=f_oper не трактуются как полностью сопоставимые по предметному содержанию; их сопоставимость ограничена совпадением ключевых характеристик фактического плана выполнения.

Таблица 2

Производительность механизма поиска
(MySQL 8.0.45, n=5, тёплый кеш)

Сценарий (активные предикаты)	Замеры t, мс	\bar{t} , мс	s, мс	95% ДИ	Записей
Полный реестр (ориент. †)	2 584†	-	-	-	667 193
area=Чуйская (код 2)	53; 53; 52; 70; 52	56,0	7,8	$\pm 9,7$	24 564
area + state=Действующее (код 2)	34; 40; 28; 33; 51	37,2	8,8	$\pm 10,9$	15 047
area + nominal=f_test	17; 11; 11; 17; 10	13,2	3,5	$\pm 4,3$	0
area + state + nominal=f_test	18; 10; 10; 9; 16	12,6	4,1	$\pm 5,1$	0
byOne (до оптимизации, nom=f_test)	4 172; 3 137; 3 134; 3 113; 3 038	3 318,8	478,6	$\pm 594,2$	0
byOne (после INDEX, nom=f_oper)	557; 526; 510; 556; 490	527,8	29,1	$\pm 36,2$	0*

Примечание: составлено авторами. (†) – одиночный ориентировочный замер, ДИ не вычислялся. (*) – 0 строк в результате: режим byOne выбирает первую запись Freq по LIMIT 1, которая может не совпадать с запрошенным номиналом; это не патологический случай – EXPLAIN ANALYZE подтверждает одинаковое число итераций независимо от результата (см. текст). Число объектов с nominal=f_oper в регионе: $O(10^2)$; конкретные значения f_test и f_oper не публикуются, поскольку в данном сравнении существенны не предметные свойства частот, а совпадение ключевых характеристик фактического плана выполнения запроса. $95\% \text{ ДИ} = \pm 2,776 \cdot s / \sqrt{5}$.

Таблица 3

Планы EXPLAIN ANALYZE для режима byOne до и после оптимизации

Характеристика плана	До CREATE INDEX	После CREATE INDEX idx_owner_area
Точка входа	Full scan: Site (271 453 стр.)	Index lookup: Owner.idx_owner_area (4 654 стр.)
Строк соединения Owner ⋈ Site (actual)	13 105	13 105 (без изменений)
Итераций подзапроса (loops, EXPLAIN ANALYZE)	25 422	25 422 (без изменений)
Сценарий замеров	nominal=f_test	nominal=f_oper (O(10 ²) объектов)
\bar{t} , мс (95% ДИ)	3 318,8 (±594,2)	527,8 (±36,2)
Ускорение (95%-й ДИ, бутстрэп)	-	в 6,2 раза [5,69–7,16 раза]

Источник: расчёты авторов по фактическим значениям EXPLAIN ANALYZE (actual rows, loops) и замерам времени выполнения запроса; бутстрэп: B=100 000 псевдовыборок, исходные замеры (табл. 2). Данные отражают внутренний агрегированный набор действующего реестра; подтверждающие неперсонализированные материалы могут быть предоставлены редакции по запросу.

После оптимизации среднее время выполнения составило $\bar{t}=527,8$ мс ($s=29,1$ мс, 95%-ный ДИ: $\pm 36,2$ мс). Для коэффициента ускорения, рассчитанного методом бутстрэпа, 95%-ный доверительный интервал составил 5,69–7,16 раза. EXPLAIN ANALYZE показал изменение точки входа в запрос: вместо полного сканирования Site (271 453 строки) использован индексный поиск по Owner.idx_owner_area (4 654 строки). При этом число итераций зависимого подзапроса (25 422) и число строк соединения Owner ⋈ Site (13 105) не меняются, то есть сам подзапрос оптимизацией не затронут. Следовательно, ускорение достигается именно за счёт устранения полного сканирования промежуточной таблицы. Сводное сопоставление планов до и после оптимизации приведено в таблице 3.

Обобщаемость выявленной закономерности. Полученный результат не следует трактовать как доказательство универсального ускорения во всех реестровых системах. Он описывает конкретную закономерность плана выполнения запроса, выявленную в исследованном реестре. Исследования производительности сложных запросов показывают, что эффективность выполнения зависит от структуры запроса, сложности связей между данными, индексирования и оптимизации [15]. Поэтому аналогичный эффект может ожидать только при одновременном выполнении трёх условий: (а) на верхнем уровне есть категориальный атрибут с низкой кардинальностью, используемый как основной фильтр; (б) запрос к нижнему уровню реализован как зависимый подзапрос; (в) индекс на этом атрибуте отсутствует. В такой ситу-

ации добавление индекса может изменить точку входа в план запроса и устранить полное сканирование промежуточной таблицы. Смежные публикации по индексированию и оптимизации выполнения SQL-запросов подтверждают, что выбранная стратегия доступа к данным и способ исполнения запроса могут существенно влиять на план и время выполнения [16; 17]; при этом конкретная величина ускорения в 6,2 раза относится только к исследованному набору данных и измеренному запросу.

Оценка числа потенциально заполняемых полей. Подсчёт атрибутов показывает, что при ручном создании записи оператор потенциально заполняет около 50 полей (Owner + Site + Freq), тогда как операция Сору оставляет для заполнения около 15 административных полей Owner. Таким образом, структурное сокращение числа потенциально заполняемых полей составляет примерно 70%. Этот показатель не следует интерпретировать как равное снижение времени работы оператора или как доказанное снижение числа ошибок ввода, поскольку хронометраж действий пользователей и анализ ошибок в настоящем исследовании не проводились. Архивные данные журнала предшествующей системы показывают, что в 2008–2012 гг. функция копирования использовалась в среднем 2 061 раз в год; эти данные подтверждают практическую востребованность сценария копирования, но не являются прямым измерением его текущего временного эффекта.

Интегрированный рабочий контур

Полученные результаты позволяют описать поиск и каскадное копирование как

связанные элементы рабочего контура. Сначала оператор выполняет поиск: в измеренных сценариях типовые запросы занимали 7–56 мс и постепенно сужали выборку от 667 193 записей до нуля. Затем может выполняться копирование: система воспроизводит дерево Owner→Site→Freq, а число потенциально заполняемых оператором полей сокращается примерно с 50 до 15. Такая логика повторного использования уже имеющихся сведений концептуально согласуется с принципом однократного предоставления данных [9; 10], однако в данной статье проверяется не общий административный эффект, а конкретные технические показатели поиска, индексирования и структурного сокращения числа полей ввода. Далее возможны экспорт выборки F' в XLSX и формирование PDF после проверки целостности выбранных записей и вычисления контрольной метки документа. Экспорт и печать в настоящей статье описываются только функционально: их влияние на производительность рабочего процесса количественно не оценивалось.

Ограничения исследования

При интерпретации результатов важно учитывать несколько ограничений. Во-первых, замеры проводились при $n=5$ и тёплом кеше, поэтому при холодном кеше численные значения могут отличаться. Во-вторых, подсчёт атрибутов схемы даёт только структурную оценку сокращения числа потенциально заполняемых полей и не доказывает пропорциональное снижение времени работы оператора. В-третьих, в исследовании не проводился хронометраж действий пользователей и не измерялась частота ошибок ввода до и после применения `Сору`. В-четвёртых, данные об интенсивности операций копирования (2 061 в год) относятся к предшествующей системе и не обязательно полностью отражают текущую практику. В-пятых, сравнение $\text{nominal}=f_{\text{test}}$ и $\text{nominal}=f_{\text{oper}}$ ограничено совпадением ключевых характеристик фактического плана выполнения запроса и не означает полной предметной эквивалентности этих частотных номиналов. В-шестых, сопоставление с близкими по тематике публикациями [11; 12] опирается на ограниченный массив открыто доступных работ и не претендует на исчерпывающий обзор всех специализированных систем управления спектром. В-седьмых, количественная оценка производительности фаз экспорта и подготовки печатных форм в данной статье не проводилась. Наконец, операция `Сору` в текущей реализации описана как каскад JDBC-вставок; её

оформление как явной ACID-транзакции относится к дальнейшей доработке.

Выводы

С учётом полученных результатов, их обсуждения и обозначенных ограничений можно сформулировать основные выводы. В статье описаны и экспериментально оценены механизмы поиска прототипа и каскадного копирования в государственном радиочастотном реестре. Ключевые результаты таковы.

1. Типовые запросы поиска выполняются за 7–56 мс; последовательное добавление предикатов сокращает пространство кандидатов от 667 193 до 0 записей.

2. Посредством EXPLAIN ANALYZE диагностирована закономерность: отсутствие индекса на Owner.area (9 значений) → полный скан Site (271 453 строки) → $f=3\ 318,8$ мс. Создание INDEX(area) даёт $f=527,8$ мс (ускорение в 6,2 раза; 95%-ный ДИ, бутстрэп: 5,69–7,16 раза), что подтверждено на операционном сценарии с ненулевым числом объектов для $\text{nominal}=f_{\text{oper}}$. Сопоставление сценариев основано на совпадении ключевых характеристик фактического плана выполнения запроса, а не на полной предметной эквивалентности $\text{nominal}=f_{\text{test}}$ и $\text{nominal}=f_{\text{oper}}$. За пределами исследованного реестра результат следует рассматривать как архитектурно обусловленное ожидание, применимое только при наличии сходного сочетания условий: категориального фильтра верхнего уровня, зависимого подзапроса и отсутствующего индекса по полю фильтрации.

3. Подсчёт атрибутов показывает снижение числа потенциально заполняемых оператором полей с около 50 до около 15, то есть примерно на 70%. Этот результат характеризует структурное сокращение объёма ввода, но не является прямым измерением времени работы оператора или частоты ошибок ввода.

К направлениям дальнейших исследований относятся хронометражное исследование с участием операторов, измерение частоты ошибок ввода до и после применения `Сору`, оформление операции `Сору` как явной ACID-транзакции, количественная оценка экспорта и печати, а также расширение эксперимента ($n \geq 30$, холодный кеш).

Список литературы

1. ITU-R. Recommendation ITU-R SM.1370-2. Design guidelines for developing automated spectrum management systems [Электронный ресурс]. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-SM.1370-2-201308-1/en> (дата обращения: 22.03.2026).
2. ITU-R. Справочник по управлению использованием спектра на национальном уровне. Женева: Международный союз электросвязи, 2005. [Электронный ресурс]. URL:

- https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-21-2005-PDF-R.pdf (дата обращения: 22.03.2026).
3. ITU-R. Handbook on Computer-Aided Techniques for Spectrum Management (CAT). Edition of 2015 // ITU. [Электронный ресурс]. URL: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-01-2015-PDF-E.pdf (дата обращения: 22.03.2026).
 4. ITU-R. Руководство по регламентарной структуре для управления использованием спектра на национальном уровне [Электронный ресурс]. Женева: Международный союз электросвязи, 2010. URL: <https://www.itu.int/pub/R-REP-SM.2093-1-2010> (дата обращения: 22.03.2026).
 5. Вартамян Ф. А. Электронное правительство как инструмент повышения качества государственных услуг // Вестник Евразийской науки. 2025. Т. 17. № s2. URL: <https://esj.today/89favn225.html> (дата обращения: 14.03.2026).
 6. Gulyukin D. O. Improving mechanisms for digital transformation of public administration at the regional level: problems and prospects // Сибирский журнал экономических и бизнес-исследований. 2025. Т. 14. № 4. С. 63–90. DOI: 10.12731/3033-5973-2025-14-4-321. URL: <https://kras-science.ru/jour/index.php/nk/article/view/321> (дата обращения: 14.03.2026).
 7. Богдановский И. Ю. Цифровизация государственных услуг: моделирование и мониторинг эффективности // Путеводитель предпринимателя. 2025. Т. 18. № 1. С. 9–14. DOI: 10.24182/2073-9885-2025-18-1-9-14. URL: <https://www.pp-mag.ru/jour/article/view/2059> (дата обращения: 14.03.2026).
 8. Малик Е. Н., Шедий М. В., Пикалов Б. В. «Электронное правительство» как интегративная платформа предоставления государственных услуг // Управленческое консультирование. 2020. № 9. С. 19–30. DOI: 10.22394/1726-1139-2020-9-19-30. URL: <https://www.acjournal.ru/jour/article/view/1511> (дата обращения: 14.03.2026).
 9. Wimmer M. A. Once-Only Principle Good Practices in Europe // The Once-Only Principle: The TOOP Project / edited by Krimmer R., Prentza A., Mamrot S. Cham: Springer International Publishing, 2021. С. 61–82. DOI: 10.1007/978-3-030-79851-2_4. ISBN: 978-3-030-79851-2.
 10. Wimmer M. A., Neuronі A. C., Frecè J. T. Approaches to Good Data Governance in Support of Public Sector Transformation Through Once-Only // Electronic Government / edited by Viale Pereira G. and others. Cham: Springer. 2020. С. 210–222. DOI: 10.1007/978-3-030-57599-1_16. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-57599-1_16 (дата обращения: 14.03.2026). ISBN: 978-3-030-57599-1.
 11. Наговицин А. И., Молоткова Б. Б., Азимов Д. У. Автоматизированная система контроля за назначением радиочастот на основе риск-ориентированного подхода при планировании радиосвязи в подразделениях робототехнических комплексов военного назначения // Известия ЮФУ. Технические науки. 2022. № 1. С. 59–70. DOI: 10.18522/2311-3103-2022-1-59-70. URL: https://izv-tn.tti.sfedu.ru/index.php/izv_tn/article/view/596 (дата обращения: 14.03.2026).
 12. Головской В. А. Функциональная модель подсистемы управления ресурсами когнитивной радиосистемы робототехнического комплекса // Известия ЮФУ. Технические науки. 2023. № 1. С. 241–251. DOI: 10.18522/2311-3103-2023-1-241-251. URL: https://izv-tn.tti.sfedu.ru/index.php/izv_tn/article/view/761 (дата обращения: 14.03.2026).
 13. Аданбаев А. М., Шантаев Н. О. Система управления радиочастотами: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 964. Киргизпатент, 2025. URL: https://base.patent.kg/evm.php?action=search_list&number_svid=964 (дата обращения: 22.03.2026).
 14. Zhang C., Liu W., Pang T., Yue Y. Optimization of correlate subquery based on distributed database // Journal of Northwestern Polytechnical University. 2021. Vol. 39. № 4. P. 909–918. DOI: 10.1051/jnwpu/20213940909. URL: <https://www.jnwpu.org/articles/jnwpu/abs/2021/04/jnwpu2021394p909/jnwpu2021394p909.html> (дата обращения: 14.03.2026).
 15. Kotiranta P., Junkkari M., Nummenmaa J. Performance of Graph and Relational Databases in Complex Queries // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. № 13. P. 6490. DOI: 10.3390/app12136490. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/13/6490> (дата обращения: 14.03.2026).
 16. Abbasi M., Bernardo M. V., Váz P., Silva J., Martins P. Optimizing Database Performance in Complex Event Processing through Indexing Strategies // Data. MDPI. 2024. Vol. 9. № 8. P. 93. DOI: 10.3390/data9080093. URL: <https://www.mdpi.com/2306-5729/9/8/93> (дата обращения: 14.03.2026).
 17. Пантелимонов М. В., Бучацкий Р. А., Жуйков Р. А. Кэширование машинного кода в динамическом компиляторе SQL-запросов для СУБД PostgreSQL // Труды Института системного программирования РАН. 2020. Т. 32. № 1. С. 205–220. DOI: 10.15514/ISPRAS-2020-32(1)-11. URL: <https://ispranproceedings.elpub.ru/jour/article/view/1245> (дата обращения: 14.03.2026).

Конфликт интересов: Авторы заявляют о наличии следующих конфликтов интересов: Аданбаев А. М. является разработчиком программного средства «Система управления радиочастотами», использованного в исследовании и официально зарегистрированного в Киргизпатенте (свидетельство № 964). Автор Сагымбаев А. А. заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors state that there are the following conflicts of interest: A. M. Adanbayev is the developer of the Radio Frequency Management System software used in the study and officially registered with Kyrgyzpatent (certificate № 964). The author Sagymbaev A. A. declares that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.



ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ СТОХАСТИЧЕСКОЙ ЭНТРОПИИ В СИСТЕМЕ КЛЕТОЧНОГО АВТОМАТА 2D И 3D РАЗМЕРНОСТИ

¹Клеммер П. С., ²Рави Кумар, ³Шебанов В. В.

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Российский университет транспорта», Москва, Российская Федерация,
e-mail: pavel.klemmer@mail.ru;

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет „МИСИС“»,
Москва, Российская Федерация;

³Частное образовательное учреждение высшего образования «Московский университет
имени С. Ю. Витте», Москва, Российская Федерация

В работе проведено сравнение динамики двух стохастических клеточных автоматов, двумерной на квадратной решетке 50×50 и на кубической $30 \times 30 \times 30$. Плотность активных клеток в начале задается единой – 0,25. Каждый вариант модели запускался 50 раз, для верификации модели и усреднения результатов динамики. Для анализа использовались временные ряды числа живых клеток, энтропия Шеннона, ее производная и фазовые траектории, а также анализ кластерной структуры клеточного автомата. По результатам моделирования для двумерной модели клеточного автомата число живых клеток снижается с 722 до 112 (4,5 % площади), энтропия – с 0,866 до 0,255 бит (потеря 71 %), характерное время релаксации ~ 480 шагов. Коэффициент вариации энтропии на финальном участке 35,4 %. Фазовые траектории сходятся к точечному аттрактору за ~ 480 шагов. С другой стороны, в трехмерной модели клеточного автомата финальная численность – 6939 клеток (25,7 % объема), энтропия снижается до 0,822 бит (потеря 15 %). Это значение составляет 82,2 % от максимально возможной энтропии (1 бит) и соответствует высокой степени неопределенности микросостояний, сопоставимой со случайной конфигурацией. Коэффициент вариации энтропии – 1,17 %. Фазовые траектории не сходятся к точечному аттрактору; система демонстрирует метастабильное поведение с сохранением информационной насыщенности. Таким образом, в проведенной численной конфигурации 3D-модель демонстрирует иной режим динамики – метастабильную самоорганизацию с сохранением высокой энтропии, тогда как 2D-модель переходит в диссипативный режим упорядочения.

Ключевые слова: клеточный автомат, фазовая траектория, кластерный анализ, энтропия Шеннона, глобальная энтропия, коэффициент вариации, локальная энтропия

STUDY OF THE BEHAVIOR OF STOCHASTIC ENTROPY IN A 2D AND 3D CELLULAR AUTOMATON SYSTEM

¹Klemmer P. S., ²Ravi Kumar, ³Shebanov V. V.

¹Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
“Russian University of Transport”, Moscow, Russian Federation,
e-mail: pavel.klemmer@mail.ru;

²Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
“National University of Science and Technology MISIS”, Moscow, Russian Federation;

³Private Educational Institution of Higher Education
“Moscow University named after S. Yu. Witte”, Moscow, Russian Federation

This study compares the dynamics of two stochastic cellular automata: a two-dimensional model on a 50×50 square lattice and a three-dimensional model on a $30 \times 30 \times 30$ cubic lattice. The initial density of active cells is uniformly set to 0.25 in both cases. Each model variant was executed 50 times to ensure verification of the model and to obtain averaged dynamic characteristics. The analysis employs time series of living cell counts, Shannon entropy and its time derivative, phase trajectories, and an examination of the cluster structure of the cellular automaton. According to the simulation results, the two-dimensional cellular automaton exhibits a decline in the number of living cells from 722 to 112 (corresponding to 4.5 % of the total area). Entropy decreases from 0.866 to 0.255 bits, representing a 71 % loss, with a characteristic relaxation time of approximately 480 steps. The coefficient of variation of entropy over the final segment reaches 35.4 %. The phase trajectories converge toward a point attractor within roughly 480 steps. Conversely, in the three-dimensional cellular automaton, the final population stabilizes at 6939 cells (accounting for 25.7 % of the total volume). Entropy declines to 0.822 bits, corresponding to a loss of only 15 %. This value constitutes 82.2 % of the maximum possible entropy (1 bit) and indicates a high degree of microstate uncertainty comparable to that of a random configuration. The coefficient of variation of entropy is 1.17 %. The phase trajectories do not converge to a point attractor; instead, the system exhibits metastable behavior while preserving information saturation. Thus, in the numerical configuration considered, the 3D model exhibits a different dynamic regime – metastable self-organization with sustained high entropy – while the 2D model transitions to a dissipative ordering regime.

Keywords: cellular automaton, phase trajectory, cluster analysis, Shannon entropy, variation coefficient, global entropy, local entropy

Введение

Клеточные автоматы (КА) более 50 лет применяются при моделировании сложных систем, где из локальных правил взаимодействия возникают пространственно-временные структуры [1, с. 21–52]. Теоретический анализ КА строится на теории информации: энтропия Шеннона количественно оценивает неопределенность дискретных состояний и их динамику [1, с. 237–240]. Методы изучения самоорганизации сформировались в классификациях правил КА [2, с. 22–25]. Характерный пример – тьюрингова универсальность «Игры в жизнь» Джона Конвея, показавшая вычислительную полноту простых КА [3, с. 89].

Круг задач, охватываемых современными исследованиями КА, достаточно широк. В частности, простейшие модели КА применяются при анализе динамических систем разной физической природы [4]. Примером могут служить методы решения классических уравнений математической физики на гексагональных сетках. Сначала их разработали для двух измерений [5], а затем распространили на трехмерные решетки. Результат – возможность учитывать пространственную анизотропию и граничные условия нестандартного типа [6]. Согласно обзору отечественных публикаций [7], интерес к стохастическим и асинхронным моделям КА растет, однако вопрос о влиянии размерности на информационную динамику проработан недостаточно.

Основное преимущество КА – способность порождать сложную макродинамику из локальных правил. Экспериментально показано, что на основе правил «Игры Жизни» можно строить логические элементы и ячейки памяти в дискретной среде [8]. Для количественной оценки эволюции таких систем широко используют энтропийный анализ. Классификация элементарных КА по энтропийным признакам позволяет выявлять переходы между упорядоченными, сложными и хаотическими режимами даже при асинхронном обновлении [9]. Стохастические эффекты и механизмы памяти в КА на данный момент находятся в центре внимания. Нейросетевые расширения КА, по имеющимся данным, эффективны в задачах обучения с подкреплением, но их энтропийные характеристики изучены слабо [10]. Предварительные данные авторов при сравнении 2D и 3D конфигураций в идентичных начальных условиях выявили выраженную дихотомию в энтропийной динамике; это требует более глубокого статистического обоснования [11]. В свою очередь, память

в локальных правилах открывает возможности для конструирования сложных динамических режимов и управления переходами в распределенных системах [12]. Математическое и программное обеспечение стохастических КА с памятью уже разработано, с его помощью моделируют нелинейные эффекты коллективной синхронизации [13].

Дополнительное направление связано с представлением клеточных автоматов в матричной форме, когда состояние всей решетки обновляется как единая матрица или тензор, а правила задаются композициями линейных операций и поэлементных нелинейностей. Это позволяет использовать оптимизированные библиотеки тензорных вычислений и на порядки ускорять симуляции. В частности, Понтес-Фильо и соавт. [14] предложили общий нейро-вдохновленный фреймворк, в котором стохастические КА, случайные булевы сети и эхо-сети эволюционируют к критическому состоянию, а динамика эффективно реализуется матричными операциями. Такой подход открывает возможности для массового ансамблевого анализа энтропийных и других статистических характеристик крупномасштабных систем, что согласуется с целями настоящей работы.

В свою очередь, в трехмерных системах проблема обостряется. Трехмерные КА усложняют задачу экспоненциальным ростом числа конфигураций, затрудняя расчет энтропии [15]. Систематическое исследование трехмерных аналогов игры «Жизнь» было проведено Бейсом [16], выявившим множество правил и динамических режимов на кубических решетках. Эпидемиологические модели КА показывают зависимость динамики от размерности и топологии [15]. С точки зрения теории информации скорость роста энтропии в многомерных клеточных автоматах строго проанализирована Бургуэтом [17], который ввел понятие перенормированной энтропии и получил оценки для d -мерного случая. Кроме того, связь между кластерной структурой и перколяционными свойствами в вероятностных клеточных автоматах исследована Хартарски [18], что важно для понимания перехода от разреженных конфигураций к связным кластерам. Отсюда возникает необходимость систематически сравнить динамику стохастической энтропии и структурную организацию в 2D и 3D клеточных автоматах.

В работе проведено систематическое сравнение энтропии, фазовых траекторий и кластеров в 2D и 3D стохастических КА при ансамблевом усреднении.

Цель исследования – сравнение динамики стохастических клеточных автоматов 2D и 3D размерностей при идентичных начальных условиях и ансамблевом усреднении, а также выявить влияние размерности решетки на характер эволюции систем.

Материалы и методы исследования

Математические модели

В основе количественного анализа – энтропия Шеннона [1, с. 238]. Для стохастических клеточных автоматов она, как известно, выступает мерой неопределенности. Оценку проводят на двух уровнях: глобальном и локальном.

Сначала – глобальная энтропия. Пусть $\Omega(t) = \{\sigma_i(t)\}_{i=1}^M$ – конфигурация системы на временном шаге t , где M – общее число клеток в решетке, $\sigma_i(t) \in \{0,1\}$ – бинарное состояние i -й клетки (1 – «живая», 0 – «мертвая»). Множество всех возможных глобальных конфигураций обозначим

$$C = \{C_k\}_{k=1}^N,$$

причем полное число микросостояний $N = 2^M$. Тогда глобальная стохастическая энтропия задается классической формулой

$$S(t) = - \sum_{k=1}^N p_k(t) \log_2 p_k(t), \quad (1)$$

где $p_k(t)$ – вероятность реализации k -й конфигурации в момент t .

Прямое вычисление $S(t)$ по формуле (1) для крупных решеток, например

$$50^3 = 125000 \text{ клеток,}$$

невозможно, так как N растет экспоненциально. Выход: локальная оценка энтропии. Берем окрестность клетки (x, y, z) на шаге t . В двумерных задачах это окрестность Мура радиуса 1. Локальный паттерн $N(x, y, z; t)$ – вектор состояний из K_c элементов, где K_c – число соседей (8 в 2D, 26 в 3D). Число уникальных конфигураций такой окрестности – 2^{K_c} . При $K_c = 26$ получаем более 67 млн комбинаций.

Вместо полного перебора всех возможных паттернов применяется оценка частотного распределения локальных конфигураций по ансамблю симуляций. На каждом временном шаге t для каждой клетки (во всех реализациях) фиксируется локальный паттерн – состояния самой клетки и ее соседей в окрестности Мура (8 в 2D, 26 в 3D). Пусть $\{c_j\}$ – множество всех уникальных паттернов, встретившихся хотя бы один раз в ансамбле на шаге t , а $N_{obs}(t)$ – их количество. Относительная частота $f_j(t)$ определяется

как доля клеток во всем ансамбле, окрестность которых совпадает с паттерном c_j :

$$f_j(t) = N_{c_j}(t) / N. \quad (2)$$

где $N_{c_j}(t)$ – число клеток с паттерном c_j в ансамбле на шаге t , N – общее число клеток во всех реализациях.

Тогда локальная энтропия для произвольной клетки, основанная на распределении паттернов по ансамблю, задается формулой

$$S_{ЛОК}(t) = - \sum_{j=1}^{N_{obs}(t)} f_j(t) \log_2 f_j(t). \quad (3)$$

Данная величина не зависит от конкретной клетки и характеризует неопределенность локального микроскопического состояния, усредненную по системе.

Глобальную энтропию системы получают усреднением локальных значений по всем клеткам ансамбля; поскольку $S_{ЛОК}$ одинакова для всех клеток, глобальная энтропия совпадает с (3):

$$S(t) = \frac{1}{M_{total}} \sum_{i=1}^{M_{total}} S_{ЛОК}(r_i, t) = S_{ЛОК}(t), \quad (4)$$

где r_i – координаты i -й клетки. M_{total} – суммарное число клеток во всех реализациях ансамбля.

Описание параметров симуляций

Сравнительную серию экспериментов проводили для 2D и 3D клеточных автоматов. Решетки: квадратная 50×50 и кубическая $30 \times 30 \times 30$. Выбрали их так, чтобы при разной размерности объем вычислений оставался сопоставимым, а кластерные структуры – репрезентативными. Граничные условия везде периодические – это исключает краевые эффекты.

Состояние каждой клетки бинарное: $\sigma_i(t) \in \{0,1\}$, единица соответствует «живой», ноль – «мертвой». Вероятность перехода в состояние 1 на следующем шаге задается логистической функцией от числа живых соседей $n_i(t)$ в окрестности Мура радиуса 1:

$$P_i(t) = \frac{1}{1 + \exp[-\beta(n_i(t) - \theta)]}, \quad (4)$$

Параметр θ – порог активации, β – крутизна функции. Для 2D взяли $\theta = 4$ (половина от 8 соседей), для 3D – $\theta = 12$ (половина от 26). $\beta = 2,0$ в обоих случаях; это значение обеспечивает плавный, но достаточно резкий переход вблизи порога, что типично для моделей с умеренной стохастичностью.

Таблица 1

Параметры численных экспериментов для 2D и 3D КА

Параметр	КА 2D	КА 3D
Размер сетки	50×50	30×30×30
Тип решетки	Квадратная	Кубическая
Граничные условия	Периодические	Периодические
Окрестность (Мура)	8 соседей	26 соседей
Начальная плотность	0,25	0,25
Функция активации	$P = \frac{1}{1 + e^{-2(n-4)}}$	$P = \frac{1}{1 + e^{-2(n-12)}}$
Режим обновления	Частично асинхронный ($\alpha = 0,15$)	Полностью асинхронный + коррелированный шум ($\sigma = 0,05$)
Число независимых запусков	50	50
Длительность симуляции	1000 шагов	1000 шагов
Основные метрики	Число живых клеток, $\langle S(t) \rangle$	Число живых клеток, $\langle S(t) \rangle$

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Начальная плотность живых клеток $\rho_0 = 0,25$ одинакова для всех экспериментов. Актуальные параметры симуляций представлены в табл. 1.

Начальные конфигурации – случайные: для каждой клетки вероятность быть живой равнялась 0,25, реализация – через генератор NumPy. Чтобы сгладить влияние конкретного распределения, каждую модель прогоняли 50 раз; параметры θ , β и ρ_0 при этом не менялись. Длительность прогона – 1000 шагов. Предварительные тесты показали: к этому моменту система либо выходит на квазистационарный режим (3D), либо достигает устойчивого состояния (2D).

Размеры решеток подбирали из соображений баланса, а именно: 50×50 для 2D и 30×30×30 для 3D – достаточно, чтобы наблюдать кластерные структуры, но не слишком велики, чтобы ансамбль из 50 запусков можно было выполнить за приемлемое время. Локальную энтропию считали по окрестности Мура: 8 соседей в 2D, 26 в 3D. Частотное распределение паттернов $\{f_i(t)\}$ оценивали по ансамблю; глобальную энтропию $S(t)$ получали усреднением локальных значений по всем клеткам согласно (3). Дополнительно фиксировали число живых клеток, плотность, проводили кластерный анализ (связные компоненты по 8/26 соседям) и строили фазовые траектории. Реализация – на Python 3.11 в среде Google Colab. Для ускорения использовали компиляцию через Numba (декораторы @jit). Визуализация выполнена с помощью Matplotlib и Seaborn, статистическая обработка – SciPy и pandas.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты численного моделирования 2D и 3D стохастических клеточных автоматов показали: расхождения между размерностями не сводятся к количественным отличиям. Геометрия решетки и структура локальных взаимодействий порождают качественно разные типы динамики. Сравнение проводили по трем основным характеристикам: изменение численности популяции, эволюция энтропии Шеннона, форма фазовых траекторий.

Рисунок 1 отражает усредненные по 50 реализациям временные ряды числа живых клеток. В двумерном случае (Conway B3/S23, сетка 50×50) наблюдается выраженная релаксация: стартовая популяция 722 клетки снижается на 84,6 % и стабилизируется на уровне 112 ± 15 клеток (4,4 % от площади). Высокий коэффициент вариации (CV составил 49,7 %) говорит о значительной стохастичности; формируются разреженные кластерные структуры. В трехмерной модели (Life B56/S4567, объем 30^3) картина принципиально иная: среднее число живых клеток не только не падает, но даже немного возрастает относительно начального уровня (с 6763 до 6939) и стабилизируется вблизи значения 6939 ± 47 клеток, что составляет примерно 25,7 % объема решетки. Коэффициент вариации числа живых клеток в стационарном режиме не превышает 0,68%, что на порядок ниже, чем в двумерном случае, и свидетельствует о высокой статистической устойчивости макроскопического состояния.

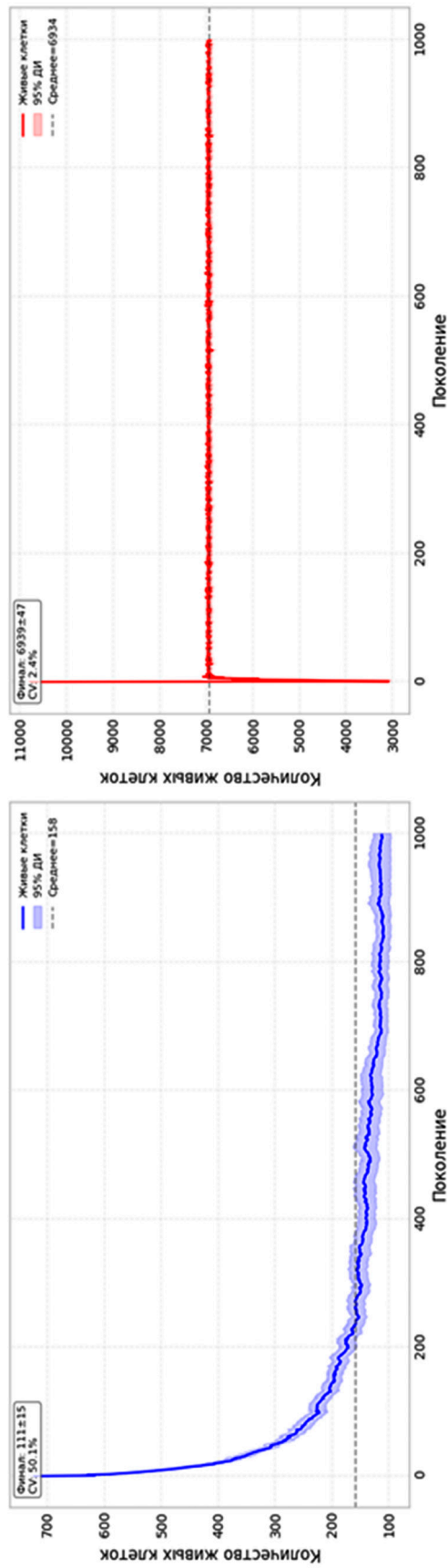


Рис. 1. Динамика числа живых клеток в КА 2D (а) и 3D (б)
 Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

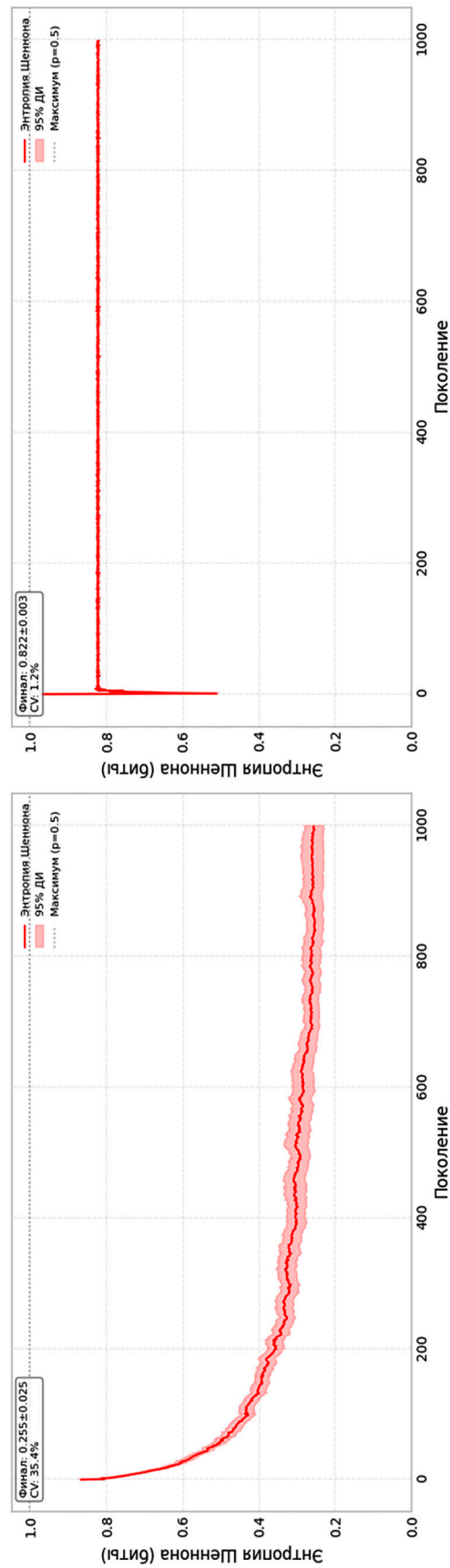


Рис. 2. Динамика стохастической энтропии в 2D (а) и 3D (б) КА
 Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Поддерживается она значительной плотностью активных элементов и непрерывными локальными перестройками в пределах окрестности Мура.

Эволюция информационной энтропии Шеннона (рис. 2) демонстрирует контрастные режимы самоорганизации. Для двумерной системы характерен глубокий спад энтропии: от начального значения 0,866 бит к асимптотическому уровню $0,255 \pm 0,025$ бит (снижение на 0,611 бит). Потеря ~71 % информационной емкости соответствует переходу в режим структурной редукции с формированием разреженных детерминированных паттернов. Коэффициент вариации энтропии в двумерной модели, оцененный как CV временного ряда средней энтропии (S) на последних 200 шагах, составил 35,4 %; CV самой финальной энтропии по ансамблю равен 35,3 % (табл. 2), оба показателя свидетельствуют о высокой остаточной изменчивости. Это довольно высокий показатель, и он говорит о том, что локальная динамика даже при общей тенденции к упорядочению остается стохастической. В трехмерной системе картина иная. Стационарный уровень энтропии здесь зафиксирован на отметке $0,822 \pm 0,003$ бит, что составляет 82,2 % от максимально возможного значения (S_{\max}). Снижение относительно начального – всего 0,149 бит. Оба коэффициента вариации энтропии в трехмерной системе минимальны: 1,2 % для временного ряда и 1,3 % для ансамблевого распределения (табл. 2). Разница между финальными значениями энтропии в 3D и 2D составляет 0,567 бит. Такое расхождение подтверждает, что режимы эволюции принципиально разные.

Столь высокая энтропия для 3D КА указывает на то, что микроскопические состояния системы остаются сильно неопределенными, а локальные паттерны не вырождаются в небольшой набор повторяющихся конфигураций. В рамках качественного анализа динамики клеточных автоматов такую ситуацию допустимо характеризовать как близкую к хаотическому состоянию, понимая под этим не строгую математическую хаотичность, а сохранение макроскопической неупорядоченности, сопоставимой со случайным распределением активных клеток. Об этом же свидетельствуют незатухающие флуктуации производной энтропии (рис. 3) и отсутствие сходимости фазовых траекторий к точечному аттрактору (рис. 4). Напротив, в двумерной модели энтропия падает до 0,255 бит – значения, характерного для сильно разреженных и частично детерминированных конфигураций. В этом

случае доминирует процесс структурной редукции: информационная насыщенность снижается, а динамика приближается к режиму с выраженным преобладанием упорядоченных паттернов.

Производная энтропии по времени (dS/dt) показана на рис. 3. Ее значения позволяют судить о скорости релаксации информационных процессов. Для начального участка характерны отрицательные значения dS/dt . В трехмерной модели этот показатель равен $-25,59 \pm 0,82 \times 10^{-3}$ бит/поколение, в двумерной – $-12,91 \pm 1,16 \times 10^{-3}$ бит/поколение. В двумерной системе флуктуации dS/dt затухают. На последних шагах среднее значение составляет $-0,048 \pm 0,581 \times 10^{-3}$ бит/поколение, амплитуда колебаний $\sigma = 1,71 \times 10^{-3}$ бит/поколение. Это соответствует режиму, близкому к стационарному. В трехмерной системе картина иная. Колебания dS/dt не затухают: размах значений остается в интервале $[-28,2; +35,5] \times 10^{-3}$ бит/поколение, амплитуда $\sigma = 2,18 \times 10^{-3}$ бит/поколение. Среднее значение за последние шаги равно $-0,113 \pm 0,509 \times 10^{-3}$ бит/поколение, то есть практически нуль, но знак колеблется.

Наблюдаемую динамику трехмерного клеточного автомата уместно охарактеризовать как метастабильную, понимая под этим следующее: на протяжении всего времени симуляции (1000 шагов) средняя энтропия (S) остается вблизи 0,822 бит без значимого тренда, коэффициент вариации энтропии на финальном участке не превышает 1,17 %, а амплитуда флуктуаций производной dS/dt составляет $2,18 \times 10^{-3}$ бит/шаг и не затухает (табл. 2). При этом ни в одной из реализаций скользящее среднее энтропии не покидало полосу $\pm 2\sigma$ относительно среднего уровня, то есть характерное время жизни метастабильного состояния превышает 1000 шагов. Такое сочетание макроскопической стабильности и микроскопических перестроек типично для метастабильных режимов в системах с локальными взаимодействиями.

Поскольку энтропия, будучи интегральной характеристикой, не позволяет судить о том, как именно организовано пространственное распределение активных элементов, дополнительно был проведен кластерный анализ с выделением связанных компонент клеточного автомата. Соответствующие количественные оценки приведены в табл. 2. Для двумерной системы обращает на себя внимание кратное сокращение плотности кластеров – с 34,7 до 5,3, то есть более чем в 6 раз. Средний размер кластера при этом сокращается с 8,24 до 7,65 клетки, а корреляционная длина ξ падает с 1,72 до 1,18 ячейки.

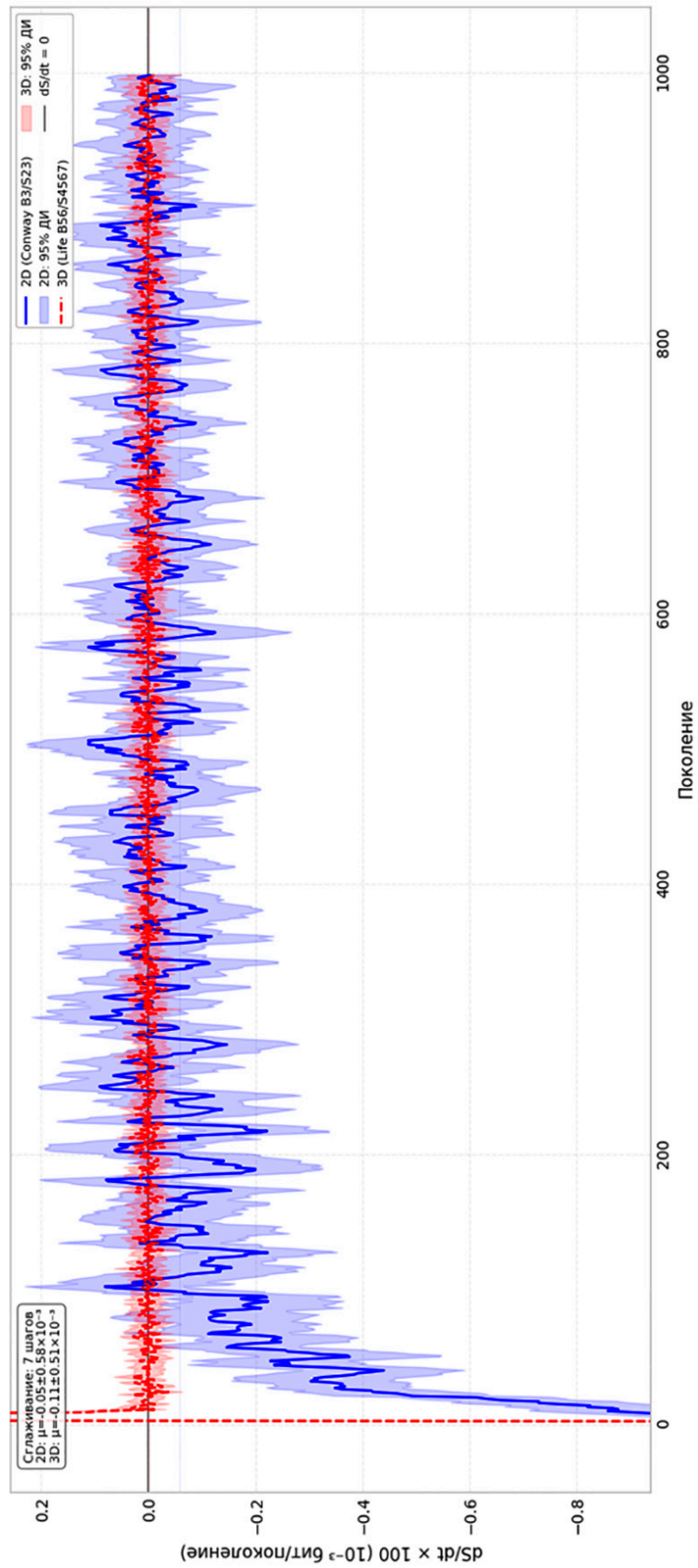


Рис. 3. Сравнение темпов изменения энтропии в 2D и 3D КА (сплошная – 2D, пунктирная линия – 3D)
 Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

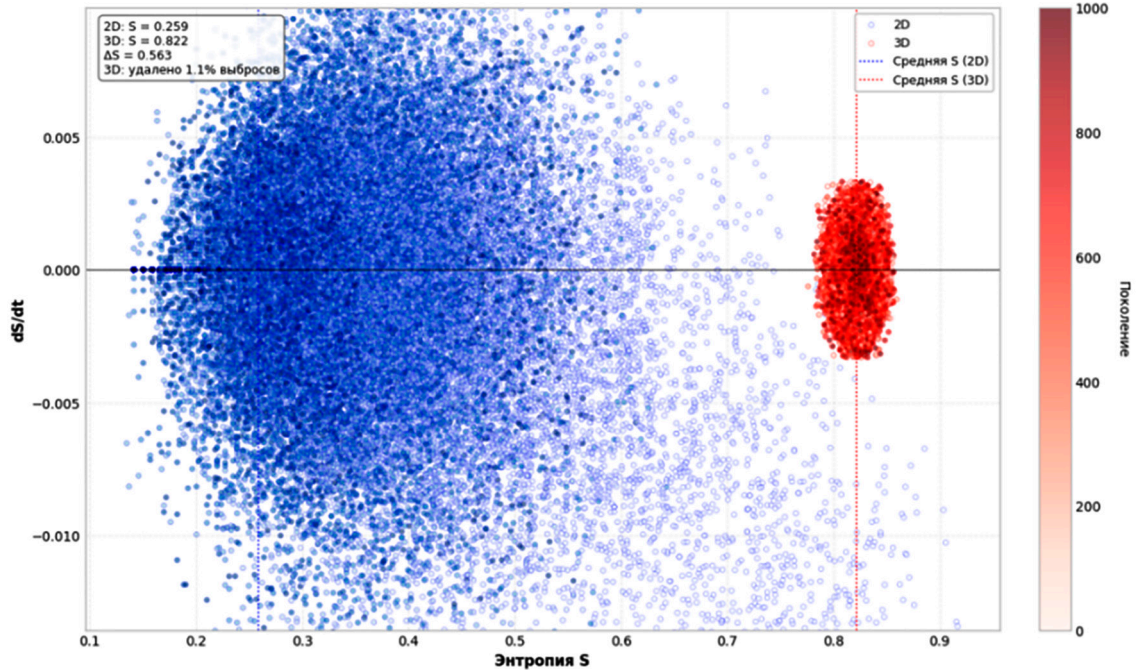


Рис. 4. Фазовый портрет динамики dS/dt от S для 2D и 3D КА
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Таблица 2

Анализ ключевых метрик статистического анализа динамики 2D и 3D КА

Показатели	2D	3D
Размер решетки	$50 \times 50 = 2500$ ячеек	$30^3 = 27\,000$ ячеек
Среднее число живых клеток ($t = 1000$)	112	6 939
95 % ДИ для среднего	[97, 127]	[6892, 6986]
SD числа живых клеток ($t = 1000$)	55,7	169,8
CV числа живых клеток ($t = 1000$), %	49,7	0,68
Начальная энтропия $\langle S(0) \rangle$, бит	0,866	0,971
Финальная энтропия $\langle S(1000) \rangle$, бит	0,255	0,822
95 % ДИ для финальной энтропии	[0,230, 0,280]	[0,819, 0,825]
SD финальной энтропии	0,090	0,011
CV(S) ансамбля ($t = 1000$), %	35,3	1,3
CV временного ряда $\langle S \rangle$ (последние 200 шагов), %	35,4	1,2
Характерное время релаксации τ , шаги	~ 480	Не достигнуто
Средняя скорость dS/dt ($t = 0-200$), $\times 10^{-3}$ бит/шаг	$12,9 \pm 1,2$ (SD)	$25,6 \pm 0,8$ (SD)
Средняя скорость dS/dt ($t = 800-1000$), $\times 10^{-3}$ бит/шаг	$0,048 \pm 0,581$ (SD)	$0,113 \pm 0,509$ (SD)
Амплитуда флуктуаций dS/dt (σ), $\times 10^{-3}$ бит/шаг	1,71	2,18
Плотность кластеров (абс.)*	$5,34 \pm 0,74$ (SD)	$20,56 \pm 0,14$ (SD)
Средний размер кластера, ед. кл.	$7,65 \pm 0,07$ (SD)	$12,48 \pm 0,03$ (SD)
Доля живых клеток в кластерах, финал	$\sim 38\%$	$\sim 67\%$
Корреляционная длина ξ , ячейки	1,18	1,63

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Все величины вида «среднее \pm интервал»: для числа живых клеток и энтропии указан 95 %-ный доверительный интервал (ДИ) для среднего по ансамблю; для скоростей и кластерных характеристик – стандартное отклонение (SD). CV числа живых клеток вычислен как SD/среднее; CV(S) для последних 200 шагов – это коэффициент вариации временного ряда средней по ансамблю энтропии $\langle S(t) \rangle$.

* Абсолютное количество связанных кластеров на всю решетку: 2500 ячеек для 2D и 27 000 ячеек для 3D. Для сопоставления на 1000 ячеек плотность составляет $\sim 2,14$ (2D) и $\sim 0,76$ (3D).

Динамика, таким образом, отображает картину фрагментации активной фазы: вместо относительно связанных областей мы видим переход к режиму разреженных и слабо взаимодействующих доменов.

В трехмерной модели динамика пространственной структуры выглядит иначе. Плотность кластеров здесь снижается умеренно – с 32,0 до 20,6, средний размер кластера практически не меняется (12,49 против 12,17 клетки), а корреляционная длина ξ сокращается незначительно: с 1,83 до 1,63 ячейки. Отношение финальных значений $\xi_3^D/\xi_2^D \approx 1,38$ показывает, что в трехмерном случае пространственные корреляции оказываются более дальнедействующими; иными словами, объемный характер взаимодействий способствует сохранению целостности кластеров и поддерживает динамическую самоорганизацию, задаваемую правилами Life B56/S4567. Следовательно, в трехмерной среде формируются устойчивые домены активности, для которых характерны локальная самоподдержка и коллективная динамика, тогда как в двумерном варианте преобладает тенденция к структурной редукции и изоляции отдельных паттернов.

Доверительные интервалы (ДИ) для среднего числа живых клеток и средней энтропии построены двумя методами: bootstrap (5000 реплик, процентильный интервал) и нормальная аппроксимация (среднее $\pm 1,96 \times \text{SEM}$); оба подхода дали практически одинаковые результаты, и в табл. 2 приведены интервалы. Коэффициент вариации числа живых клеток вычислен как $SD/\text{среднее}$ по ансамблю на финальном шаге, а $CV(S)$ для последних 200 шагов представляет собой коэффициент вариации временного ряда усредненной по ансамблю энтропии $\langle S(t) \rangle$.

Сравнение финальных распределений числа живых клеток и энтропии между 2D и 3D по U-критерию Манна – Уитни дало $p < 10^{-5}$ ($N = 50$). Доверительные интервалы в табл. 2 построены бутстрепом (5000 реплик, процентильный метод) и практически совпадают с нормальной аппроксимацией (среднее $\pm 1,96 \cdot \text{SEM}$). При повторении всей серии из 50 прогонов с 10 разными стартовыми распределениями системы, средние значения числа клеток менялись не более чем на 2 % (2D) и 0,5 % (3D), а средней энтропии – не более чем на 1,5 % и 0,2 % соответственно.

Фазовый портрет в координатах dS/dt – S приведен на рис. 4. В двумерной системе после завершения переходного процесса траектория локализуется в компактной области с координатами $S \approx 0,259 \pm 0,025$ бит

и $dS/dt \approx 0$. С точки зрения качественного анализа динамических систем такое поведение указывает на существование аттрактора – устойчивого макросостояния, к которому стремится ансамбль реализаций. Мы сознательно избегаем термина «точечный аттрактор» в строгом смысле, поскольку остаточные флуктуации энтропии свидетельствуют о сохранении стохастической компоненты. Тем не менее в пределах наблюдаемого временного окна система 2D демонстрирует выраженную сходимость к стационарному распределению с малым средним дрейфом, что оправдывает употребление понятия аттрактора в контексте статистической физики неравновесных систем. В трехмерной системе траектория локализована в узкой зоне со средним значением энтропии $0,822 \pm 0,003$ бит, флуктуации производной минимальны (0,003), однако сходимости к точке не наблюдается. Разность средних энтропий между 3D и 2D равна 0,564 бит.

Далее на рис. 5 приведена фазовая траектория в координатах плотность – энтропия (ρ – S). Для двумерной модели: начальная точка (0,289; 0,866), конечная – (0,045; 0,255). Длина траектории $L = 0,658$. Потеря энтропии – 71 %. В трехмерной модели начальные значения (0,25; 0,971), конечные – (0,257; 0,822). Длина $L = 0,868$, отношение $L_3^D/L_2^D = 1,31$.

Несмотря на то, что траектория в трехмерном случае оказывается длиннее, это не свидетельствует о более выраженной эволюции макросостояния: на протяжении всего пути энтропия остается высокой (0,822), а плотность активных клеток меняется незначительно. Наблюдаемое увеличение траектории отражает скорее богатство микроскопических перестроек, которые не приводят к заметному упорядочению, но поддерживают высокую информационную насыщенность. Для двумерной модели за 480 шагов популяция снижается с 722 до 112 ± 15 клеток (4,5 % площади решетки). Энтропия падает на 0,611 бит (71 % от исходной). Фазовые траектории выходят на точечный аттрактор ($S = 0,255 \pm 0,025$ бит). Коэффициент вариации составляет 49,7 %. Структура становится разреженной, преобладают детерминированные паттерны. В свою очередь, для трехмерной модели картина иная. Финальная численность – 6939 ± 47 клеток (25,7 % объема). Энтропия снижается на 0,149 бит (15 %), финальное значение – $0,822 \pm 0,003$ бит (82,2 % от максимума). Коэффициент вариации – 0,68 %. Система остается в квазистационарном режиме, выраженной тенденции к упорядочению не наблюдается.

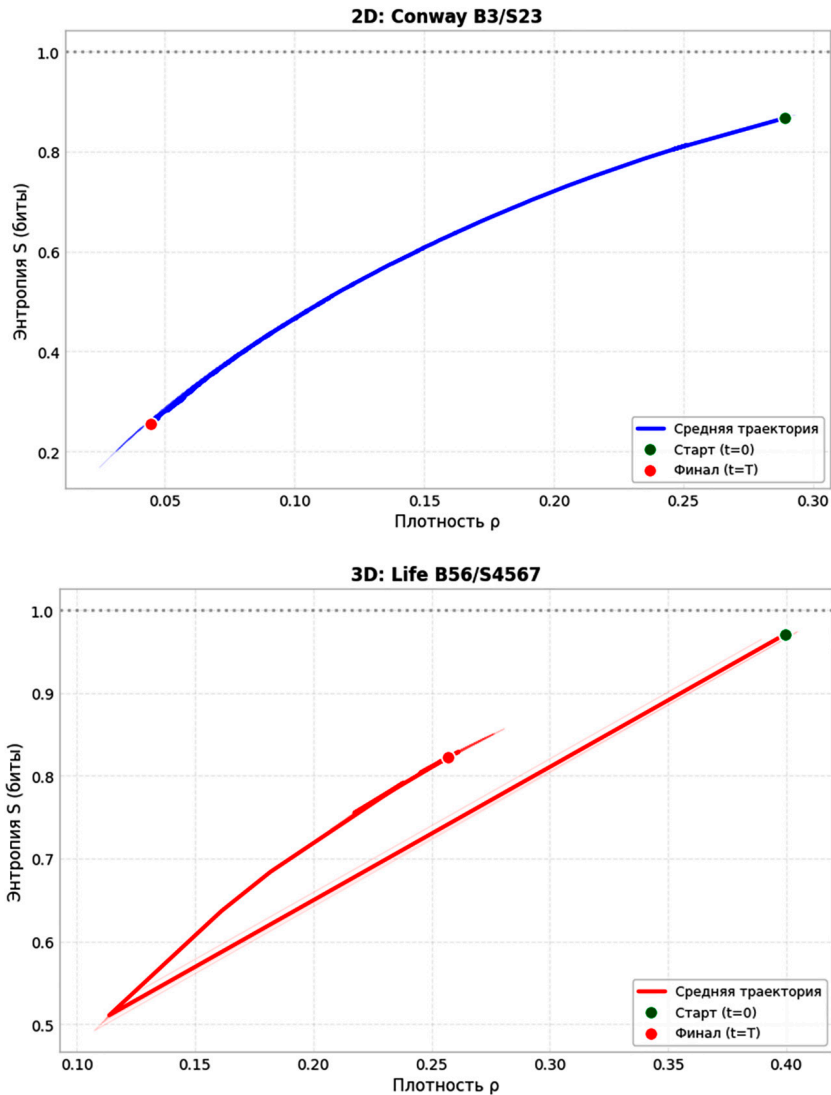


Рис. 5. Фазовая траектория в пространстве «плотность активных клеток – энтропия» ($\rho-S$) для 2D и 3D КА

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Кластерный анализ дал следующие соотношения. В трехмерной модели средний размер кластера – 12,48 клетки, в двумерной – 7,65 (разница 63 %). Корреляционная длина в 3D составляет 1,63 ячейки, в 2D – 1,18 (на 38 % выше). Доля живых клеток, входящих в кластеры, в 3D – 67 %, в 2D – 38 %. Длина фазовой траектории в координатах ($\rho-S$) для 3D оказалась 0,868, а отношение $L_3^D/L_2^D = 1,31$. В исследованной конфигурации 3D-модель демонстрирует качественно иной тип динамики: вместо диссипативной релаксации, наблюдаемой в 2D, формируется метастабильная самоорганизация с устойчивыми объемными доменами, поддерживающими коллективную активность. Следует, однако, отметить, что данное различие может быть следстви-

ем совместного влияния размерности и режима обновления; для выделения чистого эффекта размерности необходимы дополнительные контрольные эксперименты.

Заключение

В работе проведено сравнение динамики двумерного и трехмерного стохастических клеточных автоматов при идентичных начальных условиях и усреднении по 50 независимым реализациям. Ключевым результатом состоит в том, что в исследованных условиях размерность решетки оказалась сопряжена с качественным различием наблюдаемых динамических режимов. Например, 2D система демонстрирует диссипативное поведение – число активных ячеек падает с 722 до 112 (4,5 % решетки), энтропия сни-

жается с 0,866 до 0,255 бит (потеря 71%), а фазовая траектория за ~480 шагов выходит на точечный аттрактор. При этом сохраняется высокая вариабельность остаточной активности ($CV = 49,7\%$). В 3D клеточном автомате, напротив, активность не затухает: финальная популяция составляет 6939 ячеек (25,7 % объема), энтропия остается близкой к максимальной (0,822 бит, потеря всего 15 %), а фазовые траектории после 1000 шагов не сходятся, совершая метастабильные блуждания. Статистическая устойчивость в трехмерном случае оказывается на порядок выше ($CV = 0,68\%$, что в десятки раз ниже, чем в 2D). Кластерный анализ дополняет картину, средний размер кластера в 3D составляет 12,48 против 7,65 клеток в 2D, корреляционная длина выше на 38 %, а доля живых клеток, входящих в кластеры, достигает 67 % против 38 % в 2D случае.

В проведенных опытах трехмерная модель демонстрирует метастабильную динамику с высокой энтропией, тогда как двумерная – быстрый переход к упорядоченному состоянию. Поскольку наряду с размерностью различались и протоколы обновления, однозначно приписать этот контраст повышению размерности нельзя; необходимы контрольные эксперименты с унификацией режима обновления. Тем не менее выявленные соотношения свидетельствуют о топологической обусловленности устойчивости неравновесных конфигураций. Дальнейший интерес представляет изучение репродуктивных свойств многомерных кластеров и их способности формировать функционально активные среды с длительным сохранением коллективной динамики.

Список литературы

1. Ilachinski A. Cellular automata: a discrete universe. World Scientific Publishing Company, 2001. 808 p. URL: http://lib.ysu.am/disciplines_bk/10601885498bd77aa5069c30185beabd.pdf (дата обращения: 12.03.2026). ISBN 981-02-4623-4.
2. Wolfram S. A New Kind of Science. Champaign, IL: Wolfram Media, 2002. 1197 p. URL: <https://horizons-2000.org/92.%20Misc%20Files/Reading/Wolfram%20-%20A%20New%20Kind%20of%20Science.pdf> (дата обращения: 12.03.2026). ISBN 978-1-57955-008-0.
3. Rendell P. Turing Machine Universality of the Game of Life. Cham: Springer International Publishing, 2016. 182 p. DOI: 10.1007/978-3-319-19842-2. ISBN 978-3-319-19841-5.
4. Лобанов А.И. Модели клеточных автоматов // Компьютерные исследования и моделирование. 2010. Т. 2. № 3. С. 273–293. URL: <http://crm.ics.org.ru/journal/article/1726/> (дата обращения: 20.03.2026). DOI: 10.20537/2076-7633-2010-2-3-273-293.
5. Матюшкин И.В. Клеточно-автоматные методы решения классических задач математической физики на гекса-

гональной сетке. Ч. 1 // Компьютерные исследования и моделирование. 2017. Т. 9. № 2. С. 167–186. URL: <http://crm.ics.org.ru/journal/article/2554/> (дата обращения: 20.03.2026). DOI: 10.20537/2076-7633-2017-9-2-167-186.

6. Матюшкин И.В. Клеточно-автоматные методы решения классических задач математической физики на гексагональной сетке. Ч. 2 // Компьютерные исследования и моделирование. 2017. Т. 9. № 4. С. 547–566. URL: <http://crm.ics.org.ru/journal/article/2592/> (дата обращения: 20.03.2026). DOI: 10.20537/2076-7633-2017-9-4-547-566.

7. Матюшкин И.В., Заплетина М.А. Обзор по тематике клеточных автоматов на базе современных отечественных публикаций // Компьютерные исследования и моделирование. 2019. Т. 11. № 1. С. 9–57. URL: <http://crm.ics.org.ru/journal/article/2764/> (дата обращения: 20.03.2026). DOI: 10.20537/2076-7633-2019-11-1-9-57.

8. Малинецкий Г.Г., Щадинский Д.М. Конструирование вычислительного устройства на основе игры «Жизнь» // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2019. № 143. С. 1–14. URL: <https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2019-143&lg=r> (дата обращения: 20.03.2026). DOI: 10.20948/prepr-2019-143.

9. Lei Q., Lee J., Huang X., Kawasaki S. Entropy-Based Classification of Elementary Cellular Automata under Asynchronous Updating: An Experimental Study // Entropy. 2021. Vol. 23. Is. 2. Art. 209. DOI: 10.3390/e23020209.

10. Мокрецов Н.С., Татарникова Т.М. Самоорганизующиеся нейронные клеточные автоматы для обучения с подкреплением и эволюционного развития // Известия СПбГУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16. № 7. С. 68–75. URL: <https://izv.etu.ru/ru/archive/2023-t.-16/t.-16-n-7/68-75> (дата обращения: 20.03.2026). DOI: 10.32603/2071-8985-2023-16-7-68-75.

11. Шебанов В.В. Исследование поведения системы стохастической энтропии системы клеточного автомата от исходной конфигурации распределения живых клеток // Исследования молодых ученых: материалы XCIV Международной научной конференции (г. Казань, январь 2025 г.). Казань: Молодой ученый, 2025. С. 1–12. URL: <https://moluch.ru/conf/stud/archive/528/18816> (дата обращения: 20.03.2026). EDN: SBNLTT.

12. Martinez G.J., Adamatzky A., Alonso-Sanz R. Designing complex dynamics in cellular automata with memory // International Journal of Bifurcation and Chaos. 2013. Vol. 23. Art. 1330035. DOI: 10.1142/S0218127413300358.

13. Алешкин А.С., Обухова А.Г., Жуков Д.О. Математическое и программное обеспечение стохастических клеточных автоматов с памятью // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2017. Т. 13. № 2. С. 25–39. DOI: 10.25559/SITITO.2017.2.220. EDN: WXYHMS.

14. Pontes-Filho S. et al. A neuro-inspired general framework for the evolution of stochastic dynamical systems: Cellular automata, random Boolean networks and echo state networks towards criticality // Cognitive Neurodynamics. 2020. Vol. 14. Is. 5. P. 657–674. DOI: 10.1007/s11571-020-09600-x.

15. Шабунин А.В. Пространственная и временная динамика возникновения эпидемий в гибридной SIRS+V модели клеточных автоматов // Известия вузов. ПНД. 2023. Т. 31. Вып. 3. С. 271–285. DOI: 10.18500/0869-6632-003042. EDN: PBXBCY.

16. Bays C. A note about the discovery of many new rules for the Game of Three-Dimensional Life // Complex Systems. 2006. Vol. 16. P. 381–386. URL: <https://content.wolfram.com/sites/13/2023/02/16-4-7.pdf> (дата обращения: 12.05.2026). DOI: 10.25088/ComplexSystems.16.4.381.

17. Burguet D. Rescaled entropy of cellular automata // Nonlinearity. 2021. Vol. 34. Is. 7. P. 4897–4922. DOI: 10.1088/1361-6544/abfeab.

18. Hartarsky I. Bootstrap Percolation, Probabilistic Cellular Automata and Sharpness // Journal of Statistical Physics. 2022. Vol. 187. Is. 3. P. 21. DOI: 10.1007/s10955-022-02922-6.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.