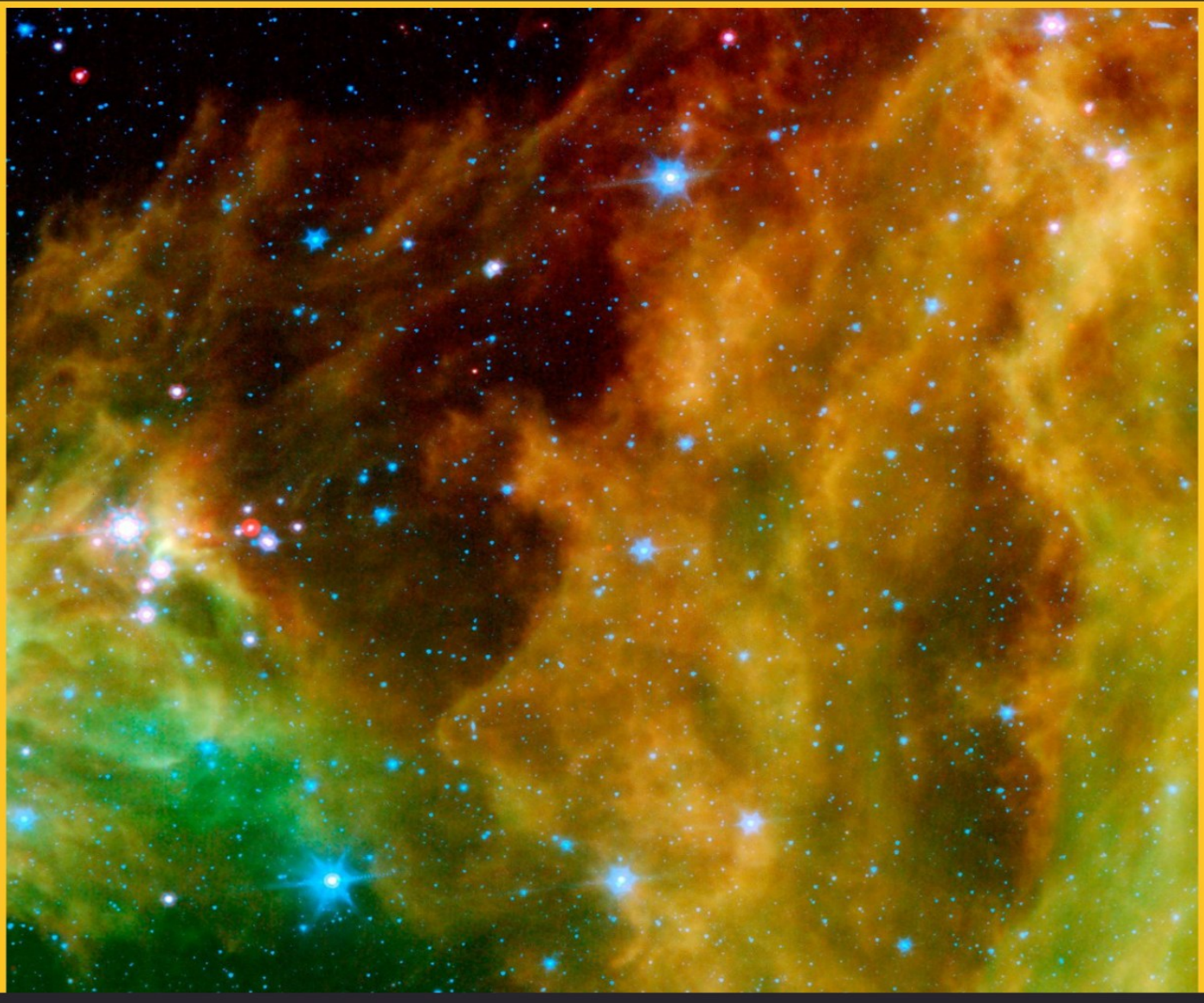
JUNE 2026 | ISSUE #6(2.2)

INTERNATIONAL JOURNAL OF PROFESSIONAL SCIENCE

INTERNATIONAL SCIENTIFIC JOURNAL



SCIPRO.RU
ISSN 2542-1085

SOCIAL SCIENCES AND HUMANITIES

UDC 001
LBC 72

International Journal Of Professional Science: international scientific journal, Nizhny Novgorod, Russia: Scientific public organization “Professional science”, №6(2.2) - 2026. 221 p.

ISSN 2542-1085

International journal of Professional Science is the research and practice edition which includes the scientific articles of students, graduate students, postdoctoral students, doctoral candidates, research scientists of Russia, the countries of FSU, Europe and beyond, reflecting the processes and the changes occurring in the structure of present knowledge.

It is destined for teachers, graduate students, students and people who are interested in contemporary science.

All articles included in the collection have been peer-reviewed and published in the form in which they were presented by the authors. The authors are responsible for the content of their articles.

The information about the published articles is provided into the system of the Russian science citation index – RSCI under contract № 2819-10/2015K from 14.10.2015

The electronic version is freely available on the website http://scipro.ru/ijps.html

UDC 001

LBC 72



Editorial team

Chief Editor – Krasnova Natalya, PhD, assistant professor of accounting and auditing the Nizhny Novgorod State University of Architecture and Construction. (mail@nkrasnova.ru)
Zhanar Zhanpeisova — Kazakhstan, PhD
Khalmatova Barno Turdyhodzhaeva — Uzbekistan, MD, Professor, Head of the Tashkent Medical Academy
Tursunov Dilmurat Abdullazhanovich — Kyrgyzstan, PhD, Osh State University
Ekaterina Petkova,Ph.D Medical University — Plovdiv
Stoyan Papanov PhD, Department of Pharmacognosy and pharmaceutical chemistry, Faculty of Pharmacy, Medical University — Plovdiv

Materials printed from the originals filed with the organizing committee responsible for the accuracy of the information are the authors of articles

Editors N.A. Krasnova, 2026

Article writers, 2026

Scientific public organization
“Professional science”, 2026

Table of contents

INTRODUCTION 6

CHEMISTRY AND MATERIALS SCIENCE 7

Zaitseva E.S., Makarova N.A. The influence of synthetic growth regulators (pyrazolopyridine and thienopyrimidine derivatives) on the growth processes of rice crops 7

INDUSTRIAL RESEARCH AND PRODUCTION 15

Artamonov A.D., Gorin D.S. The architecture of secure product lifecycle management in the PLM system of a metalworking enterprise 15

Ignatov A.A., Andreeva A.Y. A bayesian evaluation of traffic sources with temporal dynamics for banner advertising campaigns 22

MEDICAL RESEARCH AND HEALTHCARE 30

Akhmetova A.A., Inkina E.I., Kaminskaya L.A. The interest of 2nd year medical university students in the intermittent fasting diet while studying the basics of metabolic processes in the human body 30

Dolgova D.S., Markova V.V., Fakhriev F.Sh., Kochanova D.M., Kruglikov N.Y. Investigation of the effect of ovarian-uterine cycle phases on hemodynamic parameters of students of the faculty of medicine 40

Khayretdinova R.I., Nazaretyan R.A. Hyperglycemic syndrome in the early postoperative period in patients after laparotomy and laparoscopic interventions 45

Kirolos Hany Shakhlol Gerges. Lactoferrin-containing regimens for helicobacter pylori eradication: a systematic review and network meta-analysis of randomized controlled trials 50

Novikova O.A., Vaganova E.A. The Impact of Artificial Intelligence on Remote Healthcare: Enhancing Patient Engagement 61

Polukarova S.N. Methodological recommendations for bringing intelligent diagnostic systems to the HealthTech market: a comprehensive strategic analysis 79

Puzankova N.V., Kukushkin D.V. The impact of coronary angiography and subsequent revascularization on the quality of life in patients with coronary artery disease 92

Semenchuk R.I. Correction of situational anxiety in outpatient medical interventions through short-term acceptance and responsibility therapy 96

SCIENTIFIC METHODS AND TECHNOLOGIES 105

Bocharov N.A., Mildzikhov A.D. Development of a satellite image semantic segmentation model based on transformer neural networks 105

TECHNOLOGICAL DEVELOPMENTS 116

Aluev A. Observability of high-load SaaS platforms: tracing, metrics, and logging for reducing incident resolution time 116

Antipin M.E., Kimstach E. Development of a unified network environment for managing robot collaborators in the processes of labeling and product codes 125

Evstigneev N.A., Trofimenko E.V. Development of an interactive environment for visualizing step-by-step execution of algorithms on dynamic data structures 131

Vykhodtseva E., Vykhodtseva K., Shiribazarov A. Microbial fuel cell: investigation of an innovative dual-purpose system 139

TRANSPORT AND MOBILITY 142
Khalikov R.M., Ivanova O.V., Latypova Z.B., Pavlov S.Y., Glazachev A.O. Resource-saving production of geopolymer composites based on high-tonnage industrial waste for use in road construction 142
Khanov A.A., Surkova A.A. Development of the China–Kyrgyzstan–Uzbekistan transport corridor and its importance for the transit potential of the Kyrgyz republic 153
Makhova N.B., Grunina A.V., Krasnoperova U.P. Modelling of ship and wagon flows using the Poisson method 160
ENGINEERING APPLICATIONS 168
Akhrameyev V.I., Dadashev F.H., Huseynov N.E., Asadov E.Z. Rapid assessment of flight anomalies based on an intelligent microcontroller network with multifactor integration of flight, weather, and psychophysiological data 168
Churkin P.Y. Deepfakes and Synthetic Identity in Social Engineering: Deepfake Detection Methods in Audio/Video and Their Impact on Corporate and National Security 181
Lavrentiev E.A., Orlov M.S. Mathematical model and method for quantifying the angular drift of an unmanned aerial vehicle based on neural network processing of video stream 188
Supletsov V.S., Sobakin E.V. Comparative analysis of methods for assessing the physical deterioration of load-bearing steel structures of industrial buildings and structures 193
Ulyanov S.I. Advantages of using permanent magnets for lifting force generation in magnet-levitating trains 198
Zavyalov D.M. Improving surface quality during high-speed milling 210
CONCLUSION 220

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

INTRODUCTION

The issue №6(2.2) of the «International Journal of Professional Science» presents a broad interdisciplinary collection of studies reflecting the current development of natural sciences, medicine, engineering, digital technologies, industrial production and transport systems. The materials included in this issue demonstrate the growing importance of integrated scientific approaches, where experimental research, mathematical modeling, artificial intelligence, and practical technological solutions are combined to address complex professional and social challenges.

A significant part of the issue is devoted to medical research and healthcare. The articles examine metabolic processes, dietary behavior among medical students, hemodynamic changes, postoperative hyperglycemic syndrome, approaches to Helicobacter pylori eradication, and the impact of coronary interventions on patients' quality of life. Special attention is given to the role of artificial intelligence and intelligent diagnostic systems in remote healthcare, as well as to psychological support methods aimed at reducing situational anxiety during outpatient medical procedures.

The technological and engineering sections highlight the rapid development of intelligent systems, high-load SaaS platforms, robotic environments, algorithm visualization tools, satellite image segmentation models, and neural network methods for analyzing unmanned aerial vehicle behavior. Research in transport and mobility focuses on resource-saving materials for road construction, international transport corridors, flow modeling, and the potential of magnetic levitation technologies. Industrial studies also address secure product lifecycle management and data-driven evaluation of advertising traffic sources.

The issue also includes research in chemistry and materials science, presenting the influence of synthetic growth regulators on rice crop development, as well as innovative investigations into microbial fuel cells and geopolymer composites. Together, these works reflect the journal's commitment to supporting scientific dialogue across disciplines and promoting solutions that are relevant to modern industry, healthcare, infrastructure, and sustainable technological progress.

With best wishes and warm regards,
Editor-in-Chief
International Journal of Professional Science
Krasnova N.A.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

CHEMISTRY AND MATERIALS SCIENCE

UDC 631.811.98

Zaitseva E.S., Makarova N.A. The influence of synthetic growth regulators (pyrazolopyridine and thienopyrimidine derivatives) on the growth processes of rice crops

Влияние синтетических ростерегуляторов (производных пиразолопиридинов и тиенопиримидинов) на ростовые процессы рисовых культур

Zaitseva Ekaterina Sergeevna,
student,
I.T. Trubilin Kuban State Agrarian University,
Krasnodar
Makarova Natalya Anatolyevna
student,
I.T. Trubilin Kuban State Agrarian University,
Krasnodar
Academic Supervisor:
Makarova Natalya Anatolyevna
Senior Lecturer, Department of Chemistry, Kuban State Agrarian University
Зайцева Екатерина Сергеевна,
студент,
Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина,
Г. Краснодар
Макарова Наталья Анатольевна
студент,
Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина,
Г. Краснодар
Научный руководитель:
Макарова Наталья Анатольевна
Старший преподаватель кафедры химии Кубанского государственного аграрного университета

Abstract. *The current state of research on the use of synthetic azaheterocyclic growth regulators – derivatives of pyrazolopyridines and thienopyrimidines – to increase rice productivity in conditions of chloride salinization of soils is considered. The results of pre-sowing seed treatment with polymer growth regulators-film-forming agents are analyzed. The data of field tests of pyrazolopyridine compound Ia on rice of the variety Favorit, which demonstrated an increase in the length of the panicle, the number and mass of grains, as well as an improvement in biochemical and technological indicators of grain quality, are summarized. Unresolved issues have been formulated regarding the selectivity of the action of these regulators depending on the genotype and phenological phase of plant development, as well as the need for further toxicological and agronomic tests to convert the studied compounds into practical agrochemical preparations.*

Keywords*: rice, Oryza sativa, plant growth regulators, pyrazolopyridines, thienopyrimidines, soil salinization, photosynthesis, yield, grain quality, pyrimidine catabolism*

Аннотация*. Рассмотрено современное состояние исследований по применению синтетических азагетероциклических регуляторов роста – производных пиразолопиридинов и тиенопиримидинов – для повышения продуктивности риса в условиях хлоридного засоления почв. Проанализированы результаты предпосевной обработки семян полимерными рострегуляторами-плёнкообразователями. Обобщены данные полевых*

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

испытаний пиразолопиридинового соединения Ia на рисе сорта Фаворит, продемонстрировавшего увеличение длины метёлки, числа и массы зёрен, а также улучшение биохимических и технологических показателей качества зерна. Сформулированы нерешённые вопросы, касающиеся избирательности действия данных регуляторов в зависимости от генотипа и фенологической фазы развития растений, а также необходимости дальнейших токсикологических и агрономических испытаний для перевода исследуемых соединений в практические агрохимические препараты.

Ключевые слова: *рис, Oryza sativa, регуляторы роста растений, пиразолопиридины, тиенопиримидины, засоление почв, фотосинтез, урожайность, качество зерна, пиримидиновый катаболизм*

Рецензент: Сагитов Рамиль Фаргатович - кандидат технических наук, доцент. Заместитель директора, главный научный сотрудник. ООО «Научно-исследовательский проектный институт «Промышленное и гражданское строительство»

Рис (Oryza sativa L.) остаётся ключевой продовольственной культурой мирового значения, однако реализация его продуктивного потенциала систематически сдерживается абиотическими стрессорами, прежде всего засолением почв, площади которых продолжают расширяться на фоне деградации орошаемых угодий.

Традиционные агротехнические решения в значительной мере исчерпали оптимизационный резерв, что обусловливает устойчивый интерес к химической регуляции онтогенеза растений.

Производные пиразолопиридинов и тиенопиримидинов представляют в этом контексте перспективный объект исследования – их гетероциклическая структура обеспечивает высокое сродство к ферментным мишеням растительной клетки при относительно низкой экотоксикологической нагрузке, однако систематические данные о влиянии соединений этих классов на ростовые процессы риса в литературе по-прежнему ограничены.

Доценко С.П. в соавторстве исследовал применение полимерных рострегуляторов-плёнкообразователей (ПОР) – поливинилового спирта и сополимера акриламида с акриловой кислотой (СПАК) – для предпосевной обработки семян риса сорта Спальчик в условиях хлоридного засоления [1].

Установлено, что обработка семян растворами СПАК концентрацией 0,005% обеспечивает достоверное увеличение энергии прорастания, всхожести, длины и сухой массы проростков относительно контроля, превышая по регуляторному эффекту как поливиниловый спирт, так и классический фитогормон гетероауксин.

Принципиально важно, что используемые соединения относятся к физиологически активным, но экологически безопасным веществам – полимерной природы, способным при определённых температурных условиях образовывать защитные плёнки на поверхности семян, что отличает их механизм действия от низкомолекулярных синтетических регуляторов.

На уровне фотосинтетического аппарата применение СПАК проявилось в

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

увеличении второго максимума индукционных кривых замедленной флуоресценции и сокращении времени его наступления – показателей, отражающих интенсивность протонного градиента на мембранах тилакоидов и скорость транспорта электронов между фотосистемами I и II.

В условиях засоления, когда хлорид натрия на фоне удобрений снижал интенсивность первичных фотохимических реакций, предпосевная обработка СПАК частично нивелировала этот эффект – авторы характеризуют данное явление как солепротекторное действие препарата. Показательно, что влияние регулятора на фотосинтетический аппарат сохранялось на протяжении всей вегетации, хотя динамика параметров в отдельные фазы онтогенеза существенно варьировала в зависимости от фона минерального питания.

По данным вегетационного опыта, наиболее значимый практический результат достигался при совместном применении СПАК и минеральных удобрений в дозе $N_{120}P_{90}K_{60}$: урожай зерна в данном варианте превышал контрольный на 47,4% без засоления и на 56,4% – при засолении субстрата, тогда как засоление без регулятора снижало этот показатель на 30,9%. Масса 1000 зёрен и всхожесть семян нового урожая также демонстрировали закономерное улучшение при использовании СПАК на обоих фонах питания.

В работах Доценко С.П. показана принципиальная возможность управления ростовыми и продукционными процессами риса посредством предпосевной обработки семян синтетическими полимерными соединениями с рострегулирующей активностью, что составляет прямую методологическую параллель с исследованиями низкомолекулярных гетероциклических регуляторов, в том числе производных пиразолопиридинов и тиенопиримидинов [2].

Агротехнический контекст применения регуляторов роста риса детально рассмотрен в работе Аныева Д. Б. с соавторами, которые подчёркивают, что приёмы возделывания этой культуры обусловлены не только её биологическими особенностями, но и почвенно-климатическими условиями района возделывания [3].

Авторы акцентируют внимание на том, что рис, будучи важнейшей культурой орошаемого земледелия, предъявляет повышенные требования к водному режиму на протяжении всего вегетационного периода, а также к системе минерального питания – в частности, к срокам и дозам внесения азотных и фосфорных удобрений. Именно на этом агрофоне применение регуляторов роста приобретает наибольший практический смысл: синтетические соединения способны усиливать эффективность минеральных удобрений, обеспечивая дополнительный прирост урожайности без увеличения нагрузки на агроценоз.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Принципиально важные данные о биологической активности производных пиразолопиридинов применительно к рисовым культурам получены в исследованиях Тараненко В. В. и Дмитриевой И. Г. В полевых опытах 2020–2022 годов, проведённых на рисе сорта Фаворит в центральной зоне Краснодарского края, синтетическое соединение Ia из класса пиразолопиридинов при двукратной некорневой обработке в фазе кущения и флагового листа обеспечило увеличение длины метёлки на 9,0 %, числа зёрен в метёлке – на 12,2 %, массы зёрен с метёлки – на 17,5 %, массы 1000 зёрен – на 5,5 % относительно контроля [4].

При этом прибавка урожайности в среднем за три года составила 8,4 %, что превышало показатели эталонного препарата Ретацел, где средняя прибавка составила 6,4 %. Показательно, что параллельно фиксировалось улучшение качественных характеристик зерна: содержание белка при применении соединения Ia возросло на 2,8 %, амилозы – на 3,6 % относительно контроля. Эти результаты свидетельствуют о том, что гетероциклическая структура пиразолопиридинов обеспечивает комплексное воздействие на продукционный процесс риса, затрагивая одновременно как морфологические параметры колоса, так и биохимический состав зерна.

Параллельное изучение рострегулирующих свойств производных тиенопиридинов и пиразолопиридинов на злаковых культурах предпринято Дядюченко Л. В., Морозовским В. В., Назаренко Д. Ю., Балаховым А. А. и Дмитриевой И. Г. В рамках поиска новых регуляторов роста для озимой пшеницы авторами были синтезированы ряды производных 3-аминотиено[2,3-b] пиридинов и N-пиразоло[3,4-b]пиридил-3-карбоксамидов [5].

По результатам полевого скрининга во всех синтезированных рядах соединений были обнаружены представители с высоким ростстимулирующим эффектом: прибавка урожая зерна озимой пшеницы относительно контроля составила от 8,2 до 10,8 %, при этом применение препаратов положительно сказывалось на продуктивном кущении и густоте продуктивного стеблестоя.

Принципиально важно, что механизм действия указанных соединений реализуется именно через оптимизацию структуры урожая, а не через прямое увеличение индивидуальной продуктивности растения, – что типологически совпадает с характером влияния, описанного Тараненко В. В. и Дмитриевой И. Г. для риса. Это позволяет рассматривать производные пиразолопиридинов и тиенопиридинов как единую функциональную группу соединений с предсказуемым агрономическим профилем действия на зерновые культуры.

Отдельного внимания заслуживает вопрос о соотношении ростстимулирующей активности и качества зерна при использовании синтетических регуляторов [6]. Дядюченко Л. В. и Дмитриева И. Г. установили, что применение производных

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

тиенопиридинов и пиразолопиридинов на озимой пшенице не приводит к снижению содержания белка, клейковины и крахмала в зерне, тогда как Тараненко В. В. с соавторами зафиксировали для риса не только сохранение, но и достоверное улучшение биохимических показателей.

При использовании соединения Ia наблюдалось значимое повышение стекловидности зерна риса, снижение трещиноватости на 38 %, увеличение общего выхода крупы на 4,2 % и доли целого ядра в крупе на 6,4 %. Такая динамика свидетельствует о том, что в условиях рисоводства производные пиразолопиридинов демонстрируют более широкий спектр позитивного влияния на качество конечной продукции, чем аналогичные соединения на пшенице, что, по всей видимости, обусловлено специфической физиологией накопления крахмала и белков в зерновке риса.

Среди широкого спектра низкомолекулярных азагетероциклических соединений, исследуемых в качестве синтетических регуляторов роста растений, особое место занимают производные пиразолопиридинов и тиенопиримидинов, демонстрирующие выраженную физиологическую активность в отношении различных сельскохозяйственных культур.

Как показывают исследования Park и Song (2017), новые гибридные соединения класса тиенопиримидинил-1H-пиразоло[3,4-b] пиридинов эффективно синтезируются посредством трёхкомпонентной реакции 3-фенил-1-(тиенопиримидин-4-ил)-1H-пиразол-5-амина, бензоилацетонитрила и ароматического альдегида в присутствии $FeCl_3$ на основном оксиде алюминия, что открывает широкие возможности для масштабируемого получения этих веществ в целях агрохимического применения [7].

Установлено, что пиразоло[3,4-b] пиридины обладают антиоксидантными, антибактериальными, противовирусными и противоопухолевыми свойствами, а тиенопиримидины и их производные привлекают значительное внимание благодаря противораковым, противомикробным, противовирусным и противовоспалительным активностям, что свидетельствует о высоком потенциале данных структур в качестве многофункциональных биологически активных агентов.

В 2026 году проведённое исследование Цыганковой В.А, показало, что синтетические азагетероциклические соединения – производные тиенопиримидина – при экзогенном нанесении в определённых условиях оказывают катализирующий эффект на рост злаковых культур, также как и природные фитогормоны [8].

При изучении авторы выявили что проявление регуляторной активности было связано именно с наличием фенильной группы в положении 5, тетрагидрофуран-2-илметильной, циклопентильной или пиридин-3-илметильной группы в положении 3

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

кольца 3H-тиено[2,3-d] пиримидин-4-она, что обеспечило в последствии наибольшую биологическую активность.

Исследования с 2023 года во много стали сосредотачиваться на связи между экзогенным применением тиенопиримидиновых регуляторов роста и эндогенным метаболизмом пиримидинов в клетках риса. В исследования зарубежных ученых отмечается, что реакционный эффект от катализа дигидропиримидиндегидрогеназой (DHPD), дигидропиримидиназой (DHP) и β-уреидопропионазой (β-UP) является важным маркером реализации риса на стросс от засоления [9].

Это исследование показало, что транскрипты OsDHPD повышаются в суточном периоде быстрее у риса с нарушением ферментов, а рис с гиперэкспрессией OsDHPD впитывает соль слабее и показывает устойчивость к ней. Исследование доказало, что структурные аналоги субстратов пиримидинового обмена, каковыми являются тиенопиримидиновые производные помогают имитировать нормальную реакцию риса на фитогоромны и ускоренный катаболизм.

Анализ комплекса физиологических показателей, изученных в ходе скрининга тиенопиримидиновых производных, свидетельствует о том, что их действие охватывает несколько ключевых процессов продукционного потенциала растений. В частности, наиболее активные соединения вызывали значительное повышение содержания хлорофилла, а на 42,32–76,83%, хлорофилла б на 34,97–76,65%, а также каротиноидов на 30,07–127,12% по сравнению с контролем.

Содержание суммарного растворимого белка в листьях опытных растений возрастало на 10,4–24,35%, а активность каталазы – ключевого антиоксидантного фермента, обеспечивающего защиту от окислительного стресса, – увеличивалась на 33,59–46,6% при обработке наиболее активными соединениями № 4, 6, 7, 10, 13.

Полученные данные коррелируют с результатами ранее опубликованных работ той же группы авторов, в которых аналогичные ростостимулирующие и фотосинтезактивирующие эффекты тиенопиримидиновых производных были зафиксированы на посевах сорго, что подтверждает широкоспецифичность регуляторного действия данного класса соединений и перспективность их применения на рисовых культурах. Столь же важно, что концентрации, обеспечивающие биологический эффект (10^{-6} М), находятся в диапазоне, нетоксичном для окружающей среды, человека и животных, что делает исследуемые соединения экологически безопасными агентами.

Несмотря на очевидные достижения в области химического скрининга тиенопиримидиновых и пиразолопиридиновых регуляторов роста, практическое внедрение этих соединений в рисоводство сопряжено с рядом ограничений и научных

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

вопросов, требующих дальнейшего изучения.

Во-первых, избирательность регуляторного эффекта тиенопиримидиновых производных в отношении различных видов и генотипов растений, по всей видимости, объясняется специфической чувствительностью разных культур к данным соединениям, а также различиями их внутриклеточного действия на модуляцию биосинтеза, конъюгации, окисления, транспорта, метаболизма и сигнальных сетей эндогенных фитогормонов.

Во-вторых, как показали исследования на рисе, краткосрочная экспозиция к абиотическому стрессу (24 ч) не вызывала статистически значимых изменений уровней ключевых метаболитов пиримидинового катаболизма – дигидроурацила и уреидопропионата, тогда как накопление интермедиатов было зафиксировано лишь при длительном (≥ 7 сут) воздействии стресса, что свидетельствует о необходимости разработки дифференцированных схем применения регуляторов роста в зависимости от фенологической фазы культуры и интенсивности стрессорного фактора.

Наконец, несмотря на то что производные гибридных структур тиенопиримидин–пиразолопиридин демонстрируют высокие выходы синтеза (80–86%) и хорошую технологичность получения, их перевод в реальные агрохимические препараты потребует комплексных токсикологических, экотоксикологических и агрономических испытаний с обязательной оценкой остаточных количеств и поведения в почвенно-растительной системе при условиях влажного тропического рисоводства.

References

1. Переработка отходов предприятия как элемент системы экологического менеджмента качества / С. П. Доценко, О. И. Третьякова, Н. А. Макарова [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2008. – № 36. – С. 101-109.

2. Выращивание риса в условиях засоления с применением новых регуляторов роста / С. В. Кононенко, О. И. Третьякова, Ю. П. Федулов [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2008. – № 43. – С. 187-201.

3. Аныев, Д. Б. Комплекс агротехнических мероприятий по возделыванию риса / Д. Б. Аныев, Оразмырат Чандыров, О. М. Баллыев, А. П. Мурадалыев. – Текст: непосредственный // Молодой ученый. – 2023. – № 8 (455). – С. 276-279.

4. В. В. Тараненко, И. Г. Дмитриева, В. С. Муравьев Оценка эффективности применения регуляторов роста в технологии выращивания риса // Земледелие. 2023. №8.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

5. Новые регуляторы роста озимой пшеницы / Л. В. Дядюченко, В. В. Морозовский, Д. Ю. Назаренко [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2015. – № 112. – С. 288-297.

6. Дмитриева, И. Г. Изучение влияния новых регуляторов роста на урожайность и качество зерна сои / И. Г. Дмитриева // Современные векторы развития науки: Сборник статей по материалам ежегодной научно-практической конференции преподавателей по итогам НИР за 2023 год, Краснодар, 06 февраля 2024 года. – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, 2024. – С. 78-80.

7. Park J. W. Synthesis of thienopyrimidine-pyrazolo[3,4-b]pyridine hybrids / J. W. Park, Y.-H. Song // Heterocyclic Communications. – 2017. – Vol. 23, No. 4. – P. 281–285. – DOI: 10.1515/hc-2016-0181.

8. Цыганкова В. А. Chemical Screening of New Environmentally Friendly Plant Growth Regulators Among Thienopyrimidine Derivatives / В. А. Цыганкова, Н. М. Василенко, Я. В. Андрусевич [и др.] // Organic and Medicinal Chemistry International Journal. – 2026. – Vol. 14, Iss. 3. – Art. 555888. – DOI: 10.19080/OMCIJ.2026.14.555888.

9. Lopez A. J. Новые сведения о катаболических ферментах пиримидина риса / Andrea J. Lopez, Heidi Yu Narvaez-Ortiz, Maria A. Rincon-Benavides [и др.] // Frontiers in Plant Science. – 2023. – Vol. 14. – Art. 1079778. – DOI: 10.3389/fpls.2023.1079778.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 004.056

Artamonov A.D., Gorin D.S. The architecture of secure product lifecycle management in the PLM system of a metalworking enterprise

Архитектура безопасного управления жизненным циклом изделий в PLM-системе металлообрабатывающего предприятия

Artamonov Andrey Dmitrievich,
First-year student, 09.04.01 "Development and Creation of Technological CAD"
Advanced Engineering School of Microwave Electronics, RTU MIREA
Gorin Denis Stanislavovich,
Head of Department KB-3
"Software Solutions Security",
PhD in Economics,
Associate Professor
IKB RTU MIREA
Артамонов Андрей Дмитриевич,
студент 1 курса направления
09.04.01 «Разработка и создание технологического САПР»
Передовая инженерная школа СВЧ-электроники РТУ МИРЭА
Горин Денис Станиславович,
Заведующий кафедрой КБ-3
«Безопасность программных решений»,
Кандидат экономических наук,
доцент
ИКБ РТУ МИРЭА

Abstract. *The paper discusses the issues of data security in PLM systems designed to manage the lifecycle of products in the metalworking industry. The analysis of the main threats related to the storage, processing and modification of design and technological documentation is carried out. Modern approaches to ensuring the security of production data are considered, including mechanisms for user authentication, access control, document versioning, and user action auditing. The architecture of secure product lifecycle management is proposed, focused on ensuring the integrity, accessibility and traceability of information at all stages of product operation. It is shown that the integrated use of security mechanisms can reduce the risks of unauthorized access and increase the reliability of digital support of production processes.*

Keywords: *PLM system, product lifecycle, information security, metalworking, version control, change audit, access control, digital manufacturing.*

Аннотация. *В работе рассматриваются вопросы обеспечения безопасности данных в PLM-системах, предназначенных для управления жизненным циклом изделий на предприятиях металлообрабатывающей промышленности. Проведен анализ основных угроз, связанных с хранением, обработкой и изменением конструкторско-технологической документации. Рассмотрены современные подходы к обеспечению безопасности производственных данных, включая механизмы аутентификации пользователей, разграничения доступа, управления версиями документов и аудита действий пользователей. Предложена архитектура безопасного*

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

управления жизненным циклом изделий, ориентированная на обеспечение целостности, доступности и прослеживаемости информации на всех этапах работы с изделием. Показано, что комплексное применение механизмов безопасности позволяет снизить риски несанкционированного доступа и повысить надежность цифрового сопровождения производственных процессов.

***Ключевые слова**: PLM-система, жизненный цикл изделия, информационная безопасность, металлообработка, управление версиями, аудит изменений, контроль доступа, цифровое производство.*

Рецензент: Сагитов Рамиль Фаргатович - кандидат технических наук, доцент. Заместитель директора, главный научный сотрудник. ООО «Научно-исследовательский проектный институт «Промышленное и гражданское строительство»

Введение

Развитие цифровых технологий в промышленности привело к широкому внедрению систем управления жизненным циклом изделий (PLM – Product Lifecycle Management). Подобные системы позволяют объединить информацию об изделии в едином информационном пространстве и обеспечить её сопровождение на всех этапах жизненного цикла: от проектирования и подготовки производства до эксплуатации и модернизации продукции.

Для предприятий металлообрабатывающей отрасли PLM-системы имеют особое значение, поскольку позволяют централизованно хранить конструкторскую документацию, технологические карты, спецификации, производственные маршруты и другие данные, непосредственно влияющие на качество выпускаемой продукции. Использование единого источника данных снижает вероятность ошибок, связанных с использованием устаревшей документации, и повышает эффективность взаимодействия между подразделениями предприятия.

Вместе с тем рост объемов цифровой информации приводит к увеличению требований к обеспечению её безопасности. Компрометация производственных данных может привести не только к утечке конфиденциальной информации, но и к нарушению технологических процессов, выпуску продукции ненадлежащего качества и значительным финансовым потерям.

В связи с этим вопросы обеспечения безопасности PLM-систем становятся важной составляющей цифровой трансформации промышленных предприятий. Целью данной работы является анализ основных угроз безопасности PLM-систем и разработка архитектурного подхода к безопасному управлению жизненным циклом изделий в условиях металлообрабатывающего производства.

Особенности PLM-систем как объекта защиты

В отличие от традиционных корпоративных информационных систем, PLM-система работает с информацией, которая сопровождает изделие на протяжении всего периода его существования. В рамках одной системы могут одновременно

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

использоваться данные различных подразделений предприятия: конструкторских отделов, технологических служб, производственных подразделений и служб контроля качества.

Ключевой особенностью PLM-систем является высокий уровень взаимосвязи данных. Изменение одного документа может повлиять на десятки связанных объектов. Например, корректировка конструкторской документации способна потребовать обновления технологических маршрутов, спецификаций и производственных инструкций. По этой причине ошибки или несанкционированные изменения могут распространяться по всей информационной модели изделия.

Дополнительную сложность представляет длительный жизненный цикл производственной информации. Некоторые изделия могут сопровождаться документацией в течение многих лет, а иногда и десятилетий. При этом система должна обеспечивать сохранность истории изменений и возможность восстановления предыдущих версий документов.

Таким образом, обеспечение безопасности PLM-системы должно рассматриваться не только как защита от внешних угроз, но и как механизм поддержания достоверности и актуальности производственной информации.

Основные угрозы безопасности производственных данных

Современные PLM-системы подвержены широкому спектру угроз информационной безопасности. Часть из них характерна для большинства корпоративных информационных систем, однако ряд угроз напрямую связан со спецификой управления жизненным циклом изделий.

Одной из наиболее распространенных проблем является несанкционированный доступ к данным. В условиях крупного предприятия с большим количеством пользователей возникает необходимость строгого контроля прав доступа к документации. Отсутствие разграничения полномочий может привести к получению доступа к данным сотрудниками, не участвующими в соответствующих производственных процессах.

Серьезную опасность представляет нарушение целостности информации. Изменение чертежей, спецификаций или технологических карт способно привести к ошибкам при изготовлении продукции. Особенно критичными являются ситуации, когда изменения вносятся без соответствующего согласования либо не фиксируются в системе.

Отдельной проблемой является использование устаревших версий документов. При отсутствии централизованного контроля версий сотрудники могут продолжать работать с неактуальной документацией, что приводит к нарушению производственных процессов и увеличению количества брака.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Также необходимо учитывать риски, связанные с ошибками пользователей. Практика эксплуатации корпоративных систем показывает, что значительная часть инцидентов возникает не вследствие внешних атак, а в результате случайных действий сотрудников. Удаление документов, некорректное редактирование данных или нарушение регламентов работы способны нанести существенный ущерб предприятию.

Еще одним фактором риска является отсутствие механизмов аудита. В случае возникновения инцидента организация должна иметь возможность установить, кто выполнял операции с данными, когда были внесены изменения и какие объекты были затронуты.

Указанные угрозы подтверждают необходимость комплексного подхода к обеспечению безопасности PLM-систем.

Подходы к обеспечению безопасности PLM-систем

Современные подходы к защите производственных информационных систем основаны на принципе многоуровневой безопасности. Данный подход предполагает использование нескольких взаимодополняющих механизмов защиты, каждый из которых решает собственный класс задач.

Первым уровнем безопасности является аутентификация пользователей. Перед началом работы система должна удостовериться в личности пользователя и подтвердить его право на доступ к информационным ресурсам предприятия.

Следующим уровнем выступает разграничение прав доступа. Наиболее распространенным подходом является ролевая модель управления доступом, при которой каждому пользователю назначается определенная роль. Набор доступных операций определяется не конкретным сотрудником, а его функциональными обязанностями в рамках производственного процесса.

Важное место занимает управление версиями документов. Каждый объект PLM-системы должен иметь историю изменений, позволяющую отслеживать эволюцию данных и при необходимости возвращаться к предыдущим версиям. Подобный механизм обеспечивает прослеживаемость изменений и снижает риск использования устаревшей информации.

Отдельного внимания заслуживает аудит действий пользователей. Журналирование операций позволяет фиксировать факты создания, изменения и удаления объектов, а также обеспечивает возможность проведения внутреннего расследования при возникновении инцидентов.

Дополнительно могут использоваться механизмы резервного копирования и мониторинга событий безопасности. Их задача заключается в обеспечении устойчивости системы к сбоям и своевременном обнаружении подозрительной активности.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Комплексное использование перечисленных механизмов формирует основу безопасной эксплуатации PLM-системы.

Архитектура безопасного управления жизненным циклом изделий

Для обеспечения безопасности производственных данных предлагается архитектура, основанная на принципе централизованного управления информацией об изделии.

В качестве точки входа в систему выступает модуль аутентификации пользователей. После успешного прохождения процедуры идентификации выполняется проверка полномочий пользователя в соответствии с назначенной ролью. Такой подход позволяет ограничить доступ к функциональности системы и исключить выполнение операций, не предусмотренных должностными обязанностями сотрудника.

Основным компонентом архитектуры является централизованный репозиторий данных изделия. В нем хранятся конструкторские документы, технологические карты, спецификации и иные объекты, связанные с жизненным циклом продукции. Все изменения данных выполняются через единый механизм управления версиями.

Каждая операция редактирования сопровождается автоматическим созданием новой версии объекта. При этом система сохраняет историю изменений, включая информацию о пользователе, времени выполнения операции и характере внесенных изменений. Подобный подход обеспечивает прослеживаемость жизненного цикла документа и упрощает восстановление информации в случае ошибок.

Дополнительным элементом архитектуры является подсистема аудита. Она фиксирует действия пользователей и формирует журнал событий безопасности. Наличие подобного механизма позволяет контролировать соблюдение внутренних регламентов предприятия и повышает прозрачность работы системы.

Для повышения надежности хранения данных используется подсистема резервного копирования. Регулярное создание резервных копий обеспечивает возможность восстановления информации после программных сбоев, аппаратных отказов и иных нештатных ситуаций.

Таким образом, предлагаемая архитектура обеспечивает защиту данных изделия на всех этапах их жизненного цикла и позволяет снизить вероятность возникновения инцидентов информационной безопасности.

Оценка уровня защищенности PLM-системы

Для сравнительной оценки уровня защищенности PLM-системы может использоваться интегральный показатель безопасности:

$$S = 0{,}3A + 0{,}3R + 0{,}2V + 0{,}2L$$

где:

A – уровень аутентификации пользователей;

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

R – эффективность разграничения доступа;

V – уровень контроля версий документов;

L – полнота журналирования и аудита действий пользователей.

Предлагаемый показатель не претендует на роль универсальной методики оценки безопасности, однако позволяет выполнять сравнительный анализ различных архитектурных решений и определять направления дальнейшего совершенствования системы.

Заключение

В работе рассмотрены особенности обеспечения безопасности PLM-систем, используемых для управления жизненным циклом изделий на предприятиях металлообрабатывающей промышленности. Показано, что высокая значимость производственных данных требует применения комплексного подхода к их защите.

Проведен анализ основных угроз, связанных с несанкционированным доступом к информации, нарушением целостности документации, использованием устаревших версий данных и отсутствием механизмов аудита. Рассмотрены современные подходы к обеспечению безопасности производственных информационных систем.

Предложена архитектура безопасного управления жизненным циклом изделий, основанная на использовании механизмов аутентификации пользователей, ролевого разграничения доступа, управления версиями документов, аудита действий пользователей и резервного копирования данных.

Полученные результаты показывают, что применение комплексного подхода к обеспечению безопасности PLM-систем позволяет повысить надежность хранения производственной информации, обеспечить прослеживаемость изменений и снизить риски возникновения инцидентов информационной безопасности. Перспективным направлением дальнейших исследований является применение методов интеллектуального анализа событий безопасности для выявления аномалий в действиях пользователей и автоматизации процессов мониторинга защищенности производственных информационных систем.

References

1. Grieves M. Product Lifecycle Management: Driving the Next Generation of Lean Thinking. — New York: McGraw-Hill, 2006

2. Stark J. Product Lifecycle Management. Volume 1: 21st Century Paradigm for Product Realisation. — London: Springer, 2015.

3. Sandhu R., Coyne E., Feinstein H., Youman C. Role-Based Access Control Models // IEEE Computer. — 1996. — Vol. 29. — №2. — P. 38–47.

4. ISO/IEC 27001:2022 Information Security, Cybersecurity and Privacy Protection —

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Information Security Management Systems — Requirements.

5. ISO 10303-239: Product Life Cycle Support (PLCS). International Organization for Standardization, 2022.

6. Humphreys E. Information Security Management Standards: Compliance, Governance and Risk Management. — London: BSI Standards, 2016.

7. NIST Special Publication 800-53. Security and Privacy Controls for Information Systems and Organizations. National Institute of Standards and Technology, 2020.

8. IEC 62443-3-3. Industrial Communication Networks — Network and System Security. International Electrotechnical Commission, 2019.

9. Schuh G., Anderl R., Gausemeier J., ten Hompel M., Wahlster W. Industrie 4.0 Maturity Index. Managing the Digital Transformation of Companies. — Munich: Herbert Utz Verlag, 2020.

10. Терехов А.Н. Информационная безопасность корпоративных информационных систем. — Санкт-Петербург: Питер, 2021. — 352 с.

11. Гаврилов А.В., Козлов Д.В. Методы разграничения доступа в современных информационных системах // Информационные технологии. — 2022. — №7. — С. 15–22.

12. Беляев А.С. Подходы к обеспечению безопасности производственных информационных систем // Вестник информационной безопасности. — 2023. — №4. — С. 41–48.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 519.23:004.8:339.138

Ignatov A.A., Andreeva A.Y. A bayesian evaluation of traffic sources with temporal dynamics for banner advertising campaigns

Байесовская оценка источников трафика с учётом временной динамики в баннерных рекламных кампаниях

Ignatov Alexander Alekseevich
Master's student at the
Altai State Technical University named after Ivan Ivanovich Polzunov, Russia
Developer: INSPIRITUM LLC
Andreeva Angelika Yuryevna
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor
Altai State Technical University named after Ivan Ivanovich Polzunov
Игнатов Александр Алексеевич
Магистрант Алтайского государственного технического университета
имени Ивана Ивановича Ползунова.
Разработчик ООО INSPIRITUM
Андреева Ангелика Юрьевна
Кандидат физико-математических наук, доцент
Алтайский государственный технический университет имени Ивана Ивановича Ползунова

Abstract. *The paper continues the study of early filtering of unprofitable traffic sources in programmatic (RTB) advertising and presents the second iteration of a probabilistic model that accounts for how a source changes over time. Instead of evaluating a source by aggregated statistics over the whole period, the model scores it from weekly slices with priority given to recent data. The base metric is the conversion rate – the share of clicks that turn into leads – which, unlike spend or ROI, lies in the [0, 1] range and is therefore correctly smoothed in a Bayesian way toward the campaign-wide average conversion. On top of the smoothed conversion, the model adds penalties for spending without leads and for a streak of bad weeks, accounts for the lead-cost trend and the share of profitable days, and assigns each source to one of five managerial categories. The model is implemented on a React/PHP/ClickHouse stack and validated on real data from Inspiritum LLC using a plan-versus-fact scheme. On the reference campaign it reaches an Accuracy of 98.5 % with an F1-score of 0.65; it preserves profit while increasing ROI by cutting redundant spend. The approach is delivered as a decision support system that issues a ready recommendation for every source.*

Keywords: *Bayesian method, conversion rate, temporal dynamics, real-time bidding, programmatic advertising, decision support system, source scoring.*

Acknowledgements. *The research was conducted using real data from INSPIRITUM LLC.*

Аннотация. *Работа продолжает исследование раннего отсеивания бесприбыльных источников трафика в системах программатик-рекламы (real time bidding, RTB) и посвящена второй итерации вероятностной модели, которая учитывает изменение источника во времени. В отличие от оценки по агрегированной статистике за весь период, модель оценивает источник по недельным срезам с приоритетом свежих данных. Базовой метрикой выбран коэффициент конверсии – доля кликов, приводящих к лидам, – который в отличие от расхода и ROI лежит в диапазоне от нуля до единицы и потому корректно сглаживается байесовским способом к средней конверсии по кампании. Поверх сглаженной конверсии вводятся штрафы за расход без лидов и за серию неудачных недель подряд, учитываются тренд стоимости лида и доля прибыльных дней, а итоговый балл распределяет источники по пяти управленческим категориям. Модель реализована на стеке React/PHP/ClickHouse и апробирована на реальных данных ООО «Инспиритум» по схеме план-факт. На опорной кампании достигнута точность (Accuracy) 98,5 % при F1-мере 0,65; модель удерживает прибыль на исходном уровне и повышает рентабельность за счёт сокращения избыточного расхода. Подход реализован как система поддержки принятия решений, выдающая по каждому источнику готовую рекомендацию.*

Ключевые слова: *метод Байеса, коэффициент конверсии, временная динамика, real time bidding, программатик-реклама, система поддержки принятия решений, скоринг источников.*

Благодарности. *Исследование выполнено на реальных данных компании ООО «Инспиритум».*

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Рецензент: Сагитов Рамиль Фаргатович - кандидат технических наук, доцент. Заместитель директора, главный научный сотрудник. ООО «Научно-исследовательский проектный институт «Промышленное и гражданское строительство»

Введение

В программатик-рекламе показы продаются на мгновенных аукционах (RTB) за 150–200 мс [9, 12]. Это даёт гибкий таргетинг [13], но требует от менеджера анализа огромного числа источников: на одного сотрудника приходятся сотни кампаний с десятками тысяч связок «страна & рекламная сеть & приложение & место размещения». Большинство источников убыточны, а решение выкупать на них трафик или отключать нужно принимать рано, желательно до того, как источник тратит выделенный на него бюджет [2, 4].

В предыдущей работе была предложена байесовская модель, которая классифицирует источник по накопленной за период статистике. Она хорошо закрывает проблему холодного старта, но оценивает источник одним агрегированным баллом за весь период и потому не различает стабильно прибыльный источник и источник, давший один удачный всплеск, а малые источники систематически занижает. На практике это приводит к потере пласта недорогих, но прибыльных связок. Настоящая работа развивает подход во вторую итерацию, в которой источник оценивается с учётом временной динамики.

Цель работы – разработка метода оценки источников трафика, который учитывает изменение источника во времени и выдаёт готовую управленческую рекомендацию.

Задачи:

–перейти от агрегата за период к недельным срезам с приоритетом свежих данных;

–построить байесовскую оценку конверсии источника, устойчивую при малом числе кликов;

–ввести штрафы за расход без конверсий и за серию неудачных недель, учесть тренд стоимости конверсии и долю прибыльных дней;

–распределить источники по управленческим категориям и апробировать модель на реальных кампаниях по схеме план-факт.

Метод исследования

Идея байесовского подхода в том, что у исследователя есть исходное ожидание относительно неизвестной величины до получения данных конкретного объекта, и это ожидание уточняется по мере поступления наблюдений. Исходное ожидание называют априорной оценкой, уточнённое – апостериорной. Чем меньше собственных данных у объекта, тем сильнее апостериорная оценка опирается на априорную; чем больше

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

данных, тем больше она доверяет тому, что объект реально показал [1, 3]. Это свойство особенно ценно в RTB, где у нового источника наблюдений почти нет.

1. Базовая метрика и байесовское сглаживание конверсии

За базовую метрику взят коэффициент конверсии CR = leads / clicks – доля кликов, которые приводят к целевым действиям (в данном контексте лиды = конверсии). В отличие от опоры на метрики чистой прибыли, расходов и ROI в первой модели, CR лежит в диапазоне от нуля до единицы и является естественным кандидатом на байесовское сглаживание. Проблема в том, что у нового источника кликов почти нет и один клик без конверсии даёт CR=0 %, один клик с одной конверсией – CR=100 %, и ни одна из этих цифр ничего не говорит об источнике.

Сглаживание решает это через взвешенное среднее между средней конверсией по кампании и собственной конверсией источника (1):

$$posterior_cr = (leads + C \cdot global_prior_cr) / (clicks + C) \quad (1)$$

Здесь global_prior_cr = Σleads / Σclicks – средняя конверсия по всем источникам кампании, играющая роль априорного ожидания. Параметр C задаёт, сколько собственных кликов нужно источнику, чтобы перевесить это ожидание, и берётся равным 95-му перцентилю распределения кликов, то есть уровню «богатого» источника. Пока кликов меньше C, оценка держится у средней по кампании; когда кликов больше C, она сдвигается к собственной конверсии leads / clicks. Слишком малое C заставило бы модель верить шуму бедных источников, слишком большое стянуло бы всех к среднему и лишило бы оценку различающей силы. Это единственный байесовский элемент модели, остальные шаги представляют собой эвристическую постобработку, каждый из которых закрывает конкретную слабость голой оценки конверсии.

2. Временная динамика и штрафы

История источника разбивается на 6 недель обучения и 1 неделю проверки. Шесть недель взяты как эмпирический горизонт, на котором менеджер реально оценивает источник. Каждой неделе присваивается вес давности (w1…w6 = 0,40; 0,25; 0,15; 0,09; 0,06; 0,05), самая свежая неделя весит больше всего, потому что поведение источника дрейфует и свежие данные точнее отражают его текущее состояние. Все дальнейшие суммы считаются с этими весами.

Сглаженная конверсия корректируется штрафом за сжигание бюджета без конверсий (2):

$$penalized_cr = posterior_cr \cdot penalty_factor \quad (2)$$

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Множитель penalty_factor:

–Штрафует вероятность *posterior_cr* в 10 раз (умножение на 0,1), если на источник потрачено больше 2х выплат за конверсию, а лидов так и не принёс;

–Штрафует вероятность *posterior_cr* на 20%, если на источник потрачено больше 1й выплаты за конверсию, а лидов так и не принёс. Здесь источнику ещё даётся шанс «докрутить» конверсии;

–Не штрафует вероятность *posterior_cr, если у источника есть свои конверсии.*

Параллельно считаются доля прибыльных дней среди активных с теми же весами давности (*rw_pdr*), отделяющая стабильную прибыльность от разового всплеска. Ещё источнику присваивается бонус *trend_bonus* = 0,10, если стоимость лида от недели к неделе падает; и, наоборот, штраф *streak_penalty* = 0,6^N за N неблагоприятных недель среди трёх последних.

3. Итоговый балл и категории решения

Итоговый балл собирает сглаженную конверсию, долю прибыльных дней и бонус за тренд, после чего умножается на штраф за серию (3):

$$final_score = (\alpha \cdot penalized_cr + \beta \cdot rw_pdr + trend_bonus) \cdot streak_penalty \qquad (3)$$

Коэффициенты α и β задают баланс между двумя сигналами в итоговом балле. Коэффициент α взвешивает сглаженную конверсию *penalized_cr*, а коэффициент β взвешивает долю прибыльных дней *rw_pdr*. Меняя их соотношение, можно регулировать, на что модель опирается сильнее, на точечную оценку конверсии или на стабильность прибыли по дням. Для источников с хронически отрицательной общей прибылью итоговый балл дополнительно ограничивается сверху, чтобы заведомо убыточный источник не мог подняться в верх списка из-за случайно высокой конверсии. Решение принимается сравнением итогового балла с порогом threshold. Источник считается успешным, если final_score ≥ threshold. Порог тоже является настраиваемым параметром и задаёт строгость модели: чем он выше, тем меньше источников проходит отбор, но тем выше уверенность в каждом; чем он ниже, тем больше объёмов выкупаем, но ROI будет падать.

Далее, по итоговому баллу и дополнительным условиям источнику назначается одна из пяти управленческих категорий, которые описаны в таблице 1.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Таблица 1

Управленческие категории источников

Категория	Условие попадания	Управленческое действие
scale («масштабировать»)	Уверенный успех с запасом по объёму: final_score ≥ 0,75, активных недель ≥ 5, лидов ≥ 10, стоимость лида не растёт	Повысить дневные лимиты, масштабировать заработок
white («оставить»)	Прибыльный источник, не дотянувший до scale (threshold ≤ final_score < 0,75)	Оставить работать в текущих лимитах
black («исключить»)	Стабильный слив: жёсткий штраф penalty_factor = 0,1, final_score ≤ 0,15, активных недель ≥ 3	Отключить, чтобы не тратить бюджет
grey («наблюдать»)	Все остальные оценённые источники: почти без статистики, либо со «средними» метриками	Наблюдать, ничего не менять
new («новый»)	Источники без истории обучения (cold-start)	Не оценивать, пока не накопит данные

Описание экспериментов и их результатов

Модель реализована на стеке React/PHP/ClickHouse и протестирована на реальных данных ООО «Инспиритум» за март-май 2026 года. Качество классификации оценивалось экономике по стандартным метрикам Accuracy, Precision, Recall и F1, а экономика – по схеме план-факт, где предсказанная экономика источника сравнивается с фактической на отложенной тестовой неделе. Сводные результаты по 5 рекламным кампаниям приведены на рисунке 1.

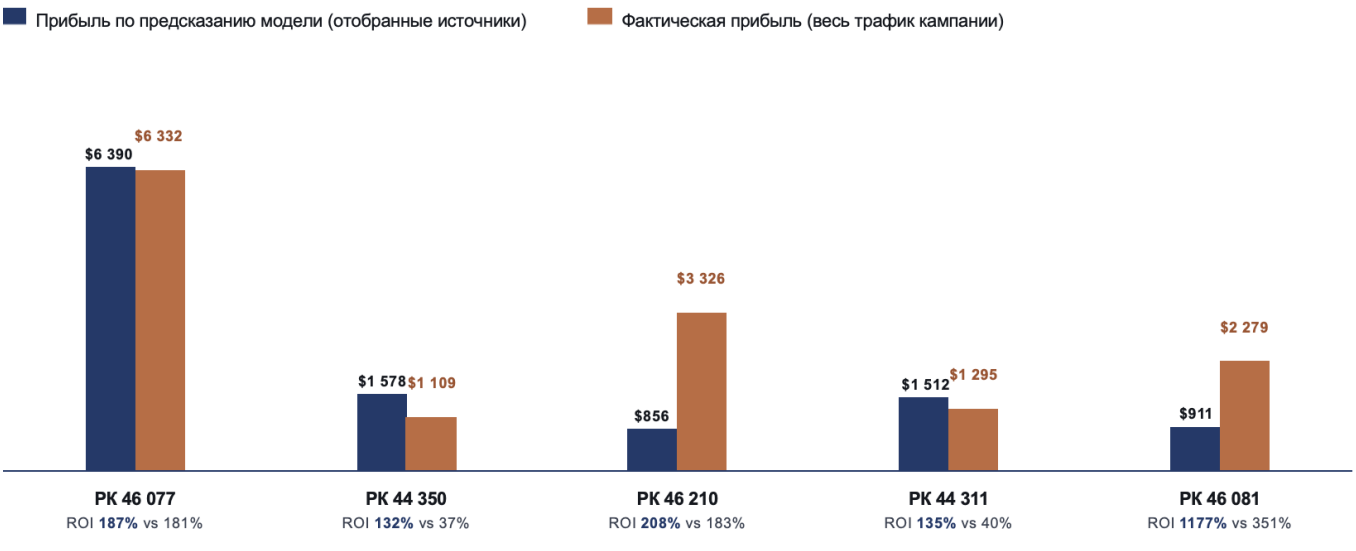


Рисунок 1 – *Сравнение метрик рекламных кампаний по предсказанию с фактическими*

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Анализ экономической целесообразности

Согласно тестам по топ-5 прибыльным рекламным кампаниям, модель удерживает почти весь объём прибыли и даже поднимает рентабельность за счёт отказа от части расхода. Ошибки модели смещены в сторону безопасного отказа от слабого объёма, а не потери крупной прибыли, что и требуется для инструмента превентивной фильтрации бюджета. Команда одобрила модель для дальнейших исследований и доработок.

Обсуждение и анализ результатов

Переход от анализа более обобщённых данных к еженедельным срезам позволил отделить устойчивую прибыльность от случайной, что было слабым местом первой итерации. Выбор конверсии в качестве базовой метрики оказалось лучшим решением, ввиду её ограниченности диапазоном [0, 1], который корректно сглаживается к глобальному приору, тогда как неограниченные величины (стоимость лида, ROI) сглаживанию поддаются плохо.

На опорной кампании достигнута точность (Accuracy) 98,5 % при F1-мере 0,65. Высокий Recall при умеренном Precision означает, что модель почти не теряет прибыльные источники, расплачиваясь за это допуском части слабых, что для задачи экономии бюджета приемлемо. Опять же, ориентироваться на теоретическую точность в данном исследовании – вторично. В первую очередь следует оценивать именно экономику предсказаний.

Также, стоит уточнить, что «новые» и «серые» источники (по сути, у которых статистики почти или совсем нет) здесь не отмечались как положительные, оттуда и просадка в объёмах чистой прибыли по РК 46210 и 46081 с новыми и «средними» связками в общей оценке. Такое поведение допустимо в рамках рекомендательной системы, так как, фактически, по результирующим предлагаемым действиям блокировки производиться не будет ни в автоматическом/ни в ручном режиме (по решению специалиста, разумеется).

Ограничения исследования

На источниках с числом кликов, близким к нулю, оценка конверсии вырождается в глобальный приор и теряет различающую силу; здесь преимущество сохраняет первая итерация за счёт сигналов расхода и прибыли. Калибровка гиперпараметров выполнена эмпирически и при смене тематики кампаний требует переоценки. Волатильность ROI между неделями учитывается только при присвоении категории, но не в самом балле. Для холодного старта разумен ансамбль двух моделей с переносом веса на вторую по мере накопления конверсий.

Заключение

Предложенная вторая итерация байесовской модели подтвердила применимость для ранней фильтрации трафика с учётом временной динамики источника.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Эксперименты на реальных данных показали Accuracy 98,5 % при F1-мере 0,65 на опорной кампании; модель удерживает прибыль на исходном уровне и повышает рентабельность за счёт сокращения избыточного расхода. Распределение источников по пяти управленческим категориям делает результат пригодным для ежедневной работы менеджера, а реализация в виде системы поддержки принятия решений на стеке React/PHP/ClickHouse обеспечивает пересчёт по запросу и кэширование результатов.

Перспективные направления развития:

–объединение двух итераций в ансамбль с переключением по объёму накопленных данных для закрытия холодного старта;

–автоматизация управленческих действий прямо из интерфейса (отключение источника, изменение лимитов и бидфлоров);

–расширение глубины анализа таргетинга до уровня города или устройства и окна истории с 6 до 12 недель.

–отказ от учёта рекламного места в связке источника, позволит уменьшить выборку, упростить и ускорить расчёты.

References

1. Ветров Д. П., Кропотов Д. А. Байесовские методы машинного обучения: курс лекций. – М.: ВМиК МГУ, 2007. – 240 с.

2. Звягин Л. С. Применение байесовского подхода в измерениях аналитических данных как фактор формирования процессов системного экономического развития // Молодой учёный. – 2017. – № 22 (156). – С. 256–261.

3. Елкин Д. А., Минаков И. А., Вольман С. И. Автоматическая оптимизация интернет-рекламы // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2011. – С. 228–232.

4. Индустриев М. А., Игнатьев М. А. Автоматизация управленческих решений как новый фактор повышения эффективности менеджмента организации // Гуманитарный научный журнал. – 2020. – № 1. – С. 68–76. – DOI: 10.24411/2078-9661-2020-10010.

5. Михайленко Н. Н. Оценка эффективности рекламной кампании в условиях информационно-технологического прогресса // Научный результат. Технологии бизнеса и сервиса. – 2023. – Т. 9, № 4. – С. 153–162. – DOI: 10.18413/2408-9346-2023-9-4-1-3.

6. Чуб В. С. Сравнительный анализ методов машинного обучения в оценке кредитных рисков // Образовательные ресурсы и технологии. – 2023. – С. 81–92. – DOI: 10.21777/2500-2112-2023-3-81-92.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

7. Пилипенко А. Ю. Прогнозирование спроса на товары средствами машинного обучения // StudNet. – 2022. – № 2. – С. 1278–1291.

8. Флах П. Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных / пер. с англ. А. А. Слинкина. – 2-е изд., эл. – М.: ДМК Пресс, 2023. – 401 с. – ISBN 978-5-89818-300-4.

9. Graepel T., Quiñonero Candela J., Borchert T., Herbrich R. Web-Scale Bayesian Click-Through Rate Prediction for Sponsored Search Advertising in Microsoft's Bing Search Engine // Proceedings of the 27th International Conference on Machine Learning (ICML-2010). – 2010. – P. 13–20.

10. He X., Pan J., Jin O. et al. Practical Lessons from Predicting Clicks on Ads at Facebook // Proceedings of the 20th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. – 2014. – P. 1–9.

11. McMahan H. B. et al. Ad Click Prediction: a View from the Trenches // Proceedings of the 19th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. – 2013. – P. 1222–1230.

12. Richardson M., Dominowska E., Ragno R. Predicting Clicks: Estimating the Click-Through Rate for New Ads // Proceedings of the 16th International World Wide Web Conference. – 2007. – P. 521–530.

13. Wang J., Zhang W., Yuan S. Display Advertising with Real-Time Bidding (RTB) and Behavioural Targeting // Foundations and Trends in Information Retrieval. – 2017. – Vol. 11, No. 4–5. – P. 297–435. – DOI: 10.1561/1500000049.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 613.24 : 577.12 : 303.62

Akhmetova A.A., Inkina E.I., Kaminskaya L.A. The interest of 2nd year medical university students in the intermittent fasting diet while studying the basics of metabolic processes in the human body

Интерес студентов 2 курса медицинского университета к диете интервального голодания при изучении основ метаболических процессов в организме человека

Akhmetova Anna Andreevna,
student, Ural State Medical University of the Russian Ministry of Health, Yekaterinburg
Inkina Evgeniya Igorevna,
student, Ural State Medical University of the Russian Ministry of Health, Yekaterinburg
Kaminskaya Lyudmila Aleksandrovna,
Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor.
Ural State Medical University of the Russian Ministry of Health, Yekaterinburg
Ахметова Анна Андреевна,
студент, ФГБОУ ВО «Уральский государственный медицинский университет» Минздрава России, г. Екатеринбург
Инкина Евгения Игоревна,
студент, ФГБОУ ВО «Уральский государственный медицинский университет» Минздрава России, г. Екатеринбург
Каминская Людмила Александровна
к.х.н. доцент, ФГБОУ ВО «Уральский государственный медицинский университет» Минздрава России, г. Екатеринбург

Abstract. *The article examines the impact of intermittent fasting on metabolic processes in the body. The purpose of the article is to study and summarize theoretical data on intermittent fasting, and the objective is to conduct a survey among student groups to determine their level of awareness about the effects of intermittent fasting on the human body. The study analyzes contemporary scientific publications from 2005 to 2024 from PubMed, CyberLeninka, and Scopus, focusing on the mechanisms of the impact of intermittent fasting on metabolism. The survey results were analyzed using Microsoft Excel statistics, which allowed for the determination of the level of awareness among students. The article's findings may be of practical interest to students studying biochemistry, pathophysiology, and nutrition, as well as to professionals in the fields of nutrition science, endocrinology, and other medical disciplines.*

Keywords*: intermittent fasting, metabolic periods, ketogenesis, autophagy.*
Abbreviations*: intermittent fasting – IF, triglycerides – TG, amino acids – AA, electron transport chain – ETC.*

Аннотация. *В статье изучается вопрос о влиянии интервального голодания на метаболические процессы в организме.* ***Цель статьи*** *- изучение и обобщение теоретических данных по вопросам интервального голодания,* ***задача*** *- проведение опроса среди студенческих групп для выявления уровня осведомленности о влиянии интервального голодания на организм человека. В рамках исследования проанализированы современные научные публикации 2005-2024 годов PubMed, CyberLeninka и Scopus, посвящённые механизмам воздействия интервального голодания на обмен веществ. Методом статистики Microsoft Excel проведен анализ результатов опроса, что позволило определить уровень информированности студентов. Материалы статьи могут представлять практический интерес для студентов, изучающих биохимию, патофизиологию, диетологию, для специалистов в области нутрициологии, эндокринологии и других медицинских направлениях.*

Ключевые слова*: интервальное голодание, периоды метаболизма, кетогенез, аутофагия.*
Сокращения*: интервальное голодание – ИГ, триглицериды – ТГ, аминокислоты – АК, электрон-транспортная цепь – ЭТЦ.*

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Рецензент: Сагитов Рамиль Фаргатович - кандидат технических наук, доцент. Заместитель директора, главный научный сотрудник. ООО «Научно-исследовательский проектный институт «Промышленное и гражданское строительство»

Введение

В настоящее время широкое развитие получила проблема режима правильного питания как один из доступных населению ведущих факторов поддержания массы тела и сохранения здоровья [1]. Одно из направлений - интервальное голодание – режим питания, который включает в себя чередование периодов приема пищи и голодания. В настоящее время интервальное голодание (intermittent fasting) приобрело широкое распространение в качестве метода питания, который ориентируется на главные принципы: периодическое использование для организма жирных кислот и кетоновых тел вместо глюкозы в качестве источника энергии[1]. Представляет метод профилактики и лечения людей с распространенной сегодня патологией: избыточной массой тела и ожирением, которое является и маркером расстройства метаболизма. Упоминание данных метаанализа свидетельствуют о распространении и эффективности ИГ [2].

По литературным данным используют наиболее частые варианты интервального голодания: равное время для периода голодания и периода приема пищи (12/12); 16 часов голодания, 8 часов для приема пищи (16/8); 5 дней человек питается как обычно, 2 дня – голодание (5/2) [1, 3, 4]. Главным преимуществом интервального голодания по литературным данным является возможность употребления любых продуктов питания в часы приема пищи [5].

В рабочей программе дисциплины Биохимия, специалитет, Лечебное дело, в модулях «Обмен углеводов, липидов, белков в организме человека, метаболические особенности в печени, миокарде» изучаются теоретические основы метаболических процессов в здоровом организме и возникающих при дефиците субстратов (тканевом голодании) патохимических механизмов, именно тех, которые в ИГ положены в основу действия. Несмотря на это, уровень знаний о биохимических и патохимических рисках остается недостаточно изученным. Данное исследование направлено на восполнение этого пробела.

Материалы и методы исследования

Для оценки уровня осведомленности студентов об интервальном голодании проведено пилотное онлайн-анкетирование на платформе Яндекс Forms в чате с подписчиками - 90 человек студентов 2 курса специалитет Лечебное дело. В ответах приняли участие 72 студента (80% от общего числа). Опрос проводился анонимно, добровольно, в течение 2 недель.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Выборка ограничена студентами одного курса и одной специальности, что не позволяет проецировать результаты исследования на всех студентов медицинских университетов или немедицинских ВУЗов. Использование онлайн-опроса и самооценки может сопровождаться субъективными искажениями. о

Разработана структурированная анкета, включавшая следующие блоки:

1. Самооценка осведомлённости о интервальном голодании по 10-балльной шкале (от 0 — «совершенно не осведомлён» до 10 — «полностью осведомлён»).
2. Наличие опыта применения методики: использовал(а) раньше; активно пользуюсь; собираюсь использовать; нет ответа.
3. Факт консультации со специалистом (врачом, диетологом, нутрициологом) перед применением: да; нет; обращался(ась) к коллегам (консультировался, но не со специалистом); не использовал данную методику.
4. Осведомлённость об использовании методики знакомыми (да/нет/не знаю)
5. Знание термина «аутофагия» в контексте интервального голодания (да/нет).
6. Оценка потенциальной пользы интервального голодания для стимуляции метаболических процессов вне периода голодания (да/нет/не знаю).
7. Самооценка индекса массы тела (ИМТ, норма 18,5-25) по категориям: пониженный, нормальный, повышенный.

Результаты

На рисунках 1, 2, 3 представлены результаты анкетирования.

1. На рисунке 1 представлена диаграмма оценки осведомлённости участников опроса в теме интервального голодания. Средний балл составил 5,8.

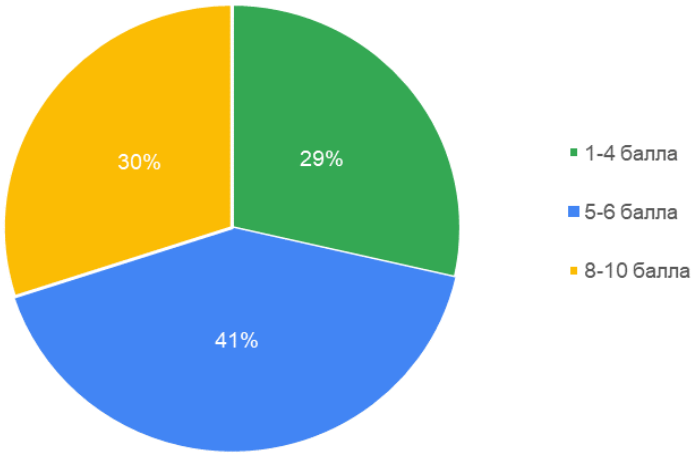


Рис.1. Оценка уровня осведомленности в теме интервального голодания.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

2. На рис 2 представлены результаты ответов: пользовались / пользуются / собираются пользоваться методикой. Результаты: «раньше использовал» – 27,8%, «собираюсь использовать» – 1,4%, «активно пользуюсь» – 4,1%, «нет ответа» – 66,7%.

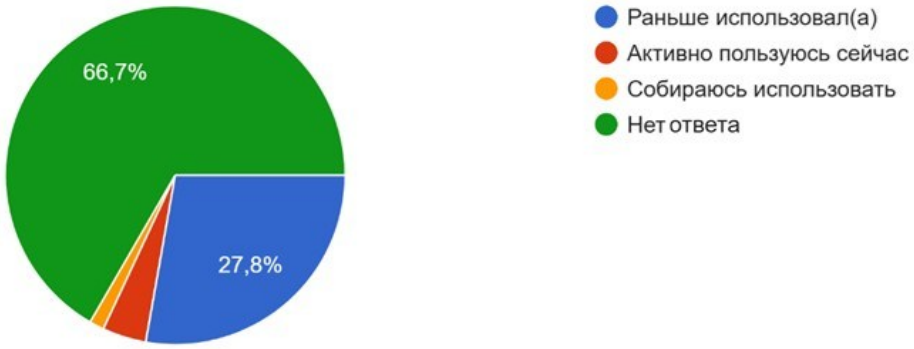


Рис.2. Оценка использования методики интервального голодания.

3. Консультация со специалистом перед началом использования. Среди тех, кто применял методику, консультировались только 1,4%, не консультировались – 44,4%, а 54,2% ответили «не использовал данную методику».

4. Использовали ли данную методику ваши знакомые. Да – 37%, нет – 24,7%, не знаю – 38,3%.

5. Знание термина «аутофагия» в контексте интервального голодания. Да – 32,9%, нет – 67,1%.

6. Может ли интервальное голодание быть полезным для стимуляции метаболических процессов вне процесса голодания? Да – 26,3%, нет – 30,3%, не знаю – 43,4%.

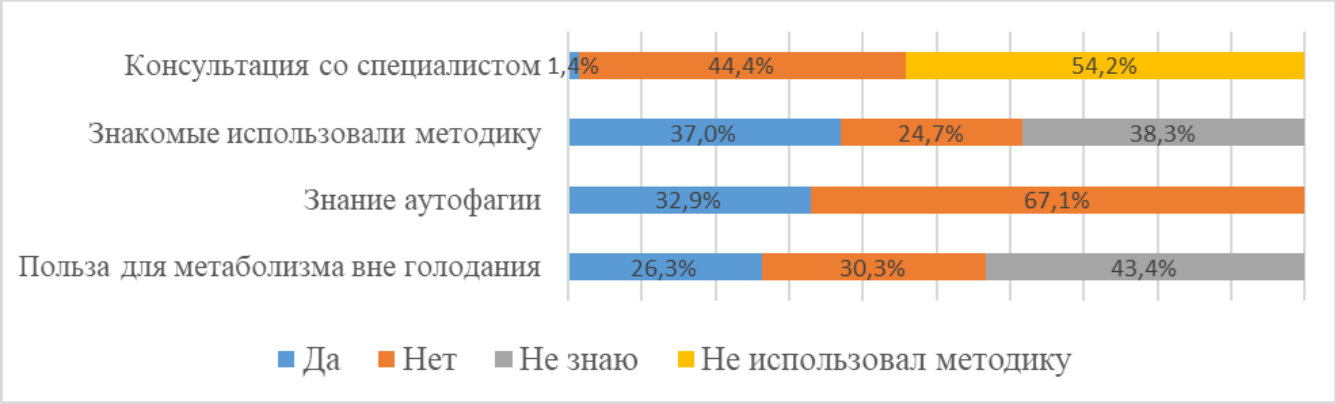


Рис.3. Распределение ответов на вопросы о консультации со специалистом, использовании методики знакомыми, знании термина аутофагия и пользы ИГ вне голодания.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

7. Индекс массы тела (ИМТ). Нормальный – 65,8%, повышенный – 20,5%, пониженный – 13,7%.

Обсуждение

Результаты проведённого анкетирования выявили неоднородность уровня осведомлённости респондентов об интервальном голодании (ИГ), несмотря на интерес и участие в анкетировании.

Большинство участников оценивают свои знания как средние (оценки 5–6, 41%) или высокие (оценки 8–10, 30%), однако существенная часть опрошенных (29%) поставила низкие оценки (1–4).

Опыт применения методики имеют или имели лишь 31,9% респондентов, тогда как 66,7% участников её не использовали и не планируют — они выбрали вариант «нет ответа». При этом подавляющее большинство опрошенных не консультировались со специалистом перед применением, что подтверждает тенденцию к самостоятельному использованию интервального голодания без профессионального сопровождения.

Сведения о распространённости метода в ближайшем окружении также разнятся:

- 37% респондентов знают, что их знакомые практиковали интервальное голодание;
- 24,7% опрошенных уверены, что среди их окружения таких случаев не было;
- 38,3% участников не располагают подобной информацией.

Особого внимания заслуживает низкий уровень осведомлённости о термине «аутофагия» (67,1%): это указывает на недостаточное понимание одного из ключевых механизмов, лежащих в основе интервального голодания.

Разделились мнения и относительно способности ИГ стимулировать метаболизм вне периодов голодания: наибольшая группа респондентов (43,4%) затруднилась с ответом, что свидетельствует о дефиците информации о долгосрочных метаболических эффектах, применяемых в методике и изучаемых в курсе биохимии.

Анализ антропометрических данных показал, что большинство участников (65,8%) имеют нормальный вес. Это позволяет сделать вывод: интерес к интервальному голоданию не ограничивается людьми с избыточной массой тела.

Рассмотрим с позиции изменения биохимических процессов стандартные периоды интервального голодания. Именно возникающие патохимические нарушения изучают в курсе биохимии студенты 2 года обучения в соответствии с нашей Рабочей программой. В методике ИГ в зависимости от времени приема пищи и времени без еды выделяют фазы метаболических процессов, которые связывают между собой углеводный, липидный и отчасти белковый обмены:

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

1. Абсорбтивный период длится 2-4 часа после приема пищи, представляет из себя начальную фазу пищеварения, в которую происходит использование белков, жиров и углеводов с образованием хиломикронов, аминокислот, моносахаров, которые затем всасываются в кровь. Период характеризуется выделением клетками поджелудочной железы инсулина [5], что способствует снижению глюкозы в крови и накоплению гликогена в печени и скелетных мышцах. Так же происходит депонирование липидов в виде триглицеридов в составе адипоцитов, синтезируются белки, что соответствует действию инсулина [6].

2. Постабсорбтивный период – наступает через 4-6 часов после приема пищи и длится до 12-16 часов. В это время происходит снижение уровня глюкозы, выделение глюкагона и мобилизация гликогена печени и ТГ адипоцитов для восполнения энергетических затрат организма. Умеренно используются ТГ, а также АК, как субстраты глюконеогенеза для обеспечения интеграции метаболических процессов в миокарде, скелетных мышцах и клетках нервной ткани. [6].

3. Период голодания наступает, когда пища длительное время не поступает в организм. Запасы гликогена в печени и мышцах снижаются, возникает необходимость использовать другие источники энергии, которыми являются в этот период липиды. Активно протекают процессы липолиза в адипоцитах и бета-окисления жирных кислот и синтез кетоновых тел (кетоногенез) в печени. Данный период так же называют кетоновой фазой, она наступает через 16 и более часов после приема пищи. Наиболее опасные для метаболизма происходят процессы именно в этот период: накопление кетоновых тел вследствие снижения их транспорта и включения в энергетический обмен реакций цикла Кребса. В нуждающихся в энергии тканях дефицит сукцинилКоА и оксалоацетата, которые необходимы для использования кетоновых тел в виде субстрата биологического окисления ацетилКоА. Удлинение этой фазы интервального голодания и недостаточная обеспеченность запасами гликогена тканей, нуждающихся в энергии, может вызвать тяжелые явления кетонемии, ацидоза и в конечном счете ацетонемии. Именно этих осложнений следует опасаться.

Для удобства обсуждения проблемы на рис. 4 представлена в соответствии с вышеприведенным текстом схема биохимических и патохимических особенностей периодов метаболизма при интервальном голодании; выделены периоды анаболических и катаболических процессов.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

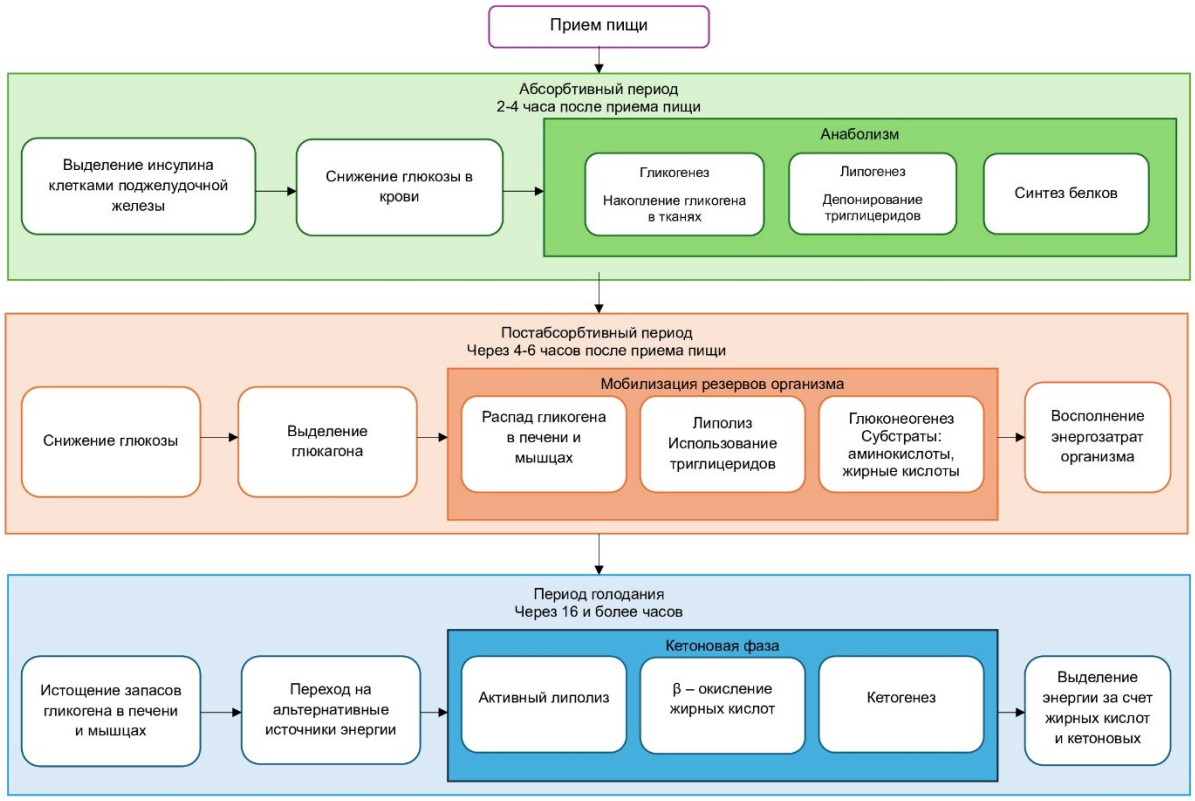


Рис.4 Схема биохимических и патохимических особенностей периодов метаболизма при интервальном голодании.

Изменения при выполнении диеты охватывают многие регуляторные системы организма. В условиях голодания организм претерпевает изменения, направленные на поддержание энергетического баланса, выживание и адаптацию организма к дефициту питательных веществ.

Лептин, который информирует гипоталамус о достаточности жировых запасов и подавляет аппетит, снижается, что приводит к повышению чувства голода. В ряде исследований отмечается снижение компульсивного переедания, улучшение сна, повышение уровня энергии и снижение ощущения голода перед сном при длительном соблюдении принципов ИГ. [4,7].

Отмечается снижение инсулина и повышенное выделение контринсулярных гормонов. В первую очередь гипогликемия стимулирует выделение в кровь глюкагона, который мобилизует запасы гликогена в печени и мышцах, и кортизола, стимулирующего глюконеогенез в печени, основными субстратами которого являются ТГ и АК. Также надпочечники секретируют адреналин, который стимулирует липолиз и

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

ускоряет вышеперечисленные процессы. В ночное время выделяется соматотропин, который активизирует расщепление липидов.

Снижение количества жировой ткани является основной целью при терапии ожирения. Согласно исследованиям, вероятно, висцеральный жир более подвержен липолизу в периоды голодания у лиц с повышенным ИМТ. Однако данные разняться, т.к. некоторые свидетельствуют об увеличении уровня свободных жирных кислот в крови и триглицеридов печени у лиц с нормальным ИМТ [5].

В развитии патохимических изменений в процесс ИГ значительная роль может принадлежать тканевой щелочной фосфатазе (TNAP) и глицеролу, который выделяется при липолизе ТГ в кровь. TNAP активируется глицеролом, имеет «глицероловый» карман, вызывает разобщение синтеза АТФ, увеличивая в момент образования в ЭТЦ гидролиз макроэргического соединения. Это сопровождается снижением синтеза АТФ и, соответственно, увеличением липолиза. Присутствие TNAP обнаружено в клетках сосудов гематоэнцефалического барьера, выполняет защиту мозга от токсинов [8].

Следует сказать, что отмечаются риски ИГ для людей с сахарным диабетом 2 типа, а после прекращения использования данной методики нередко вес возвращается к исходному уровню [1].

В исследованиях [9,10] отмечаются несколько механизмов, ответственных за продление жизни при ограничении калорийности и интервальном голодании:

1. В исследованиях на грызунах, обезьянах и людях отмечается повышение чувствительности к инсулину, снижение уровня окислительного стресса, улучшение иммунной функции организма [9,10].
2. Активируются процессы аутофагии, чрезвычайно важного внутриклеточного механизма, которому придают значение в процессе ИГ.

Аутофагия – это процесс разрушения органелл клетки с последующим ресинтезом. Считается, что этот механизм играет важную роль в процессах адаптации организма в условиях ограниченных пищевых ресурсов [9,10].

Механизм аутофагии заключается в образовании аутофагосомы, состоящей из мембраны и поврежденных фрагментов клетки. Аутофагосома сливается с лизосомой, образуется аутолизосома, где клеточные структуры разрушаются до мономеров: аминокислот, жирных кислот и нуклеотидов. Образовавшиеся соединения используются для биосинтеза необходимых метаболитов и в качестве энергоресурсов организма [3, 11].

В результате интервального голодания и аутофагии снижается уровень ЛПНП, токсических веществ, биомаркеров воспаления и свободных радикалов. Соответственно, уменьшается окислительный стресс, процессы воспаления и повреждения клеток [1,3,6].

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Заключение

По данным опроса студентов 2 курса медицинского университета об интервальном голодании выяснилось, что ИГ – достаточно известная тема, но её практикует лишь меньшинство опрошенных (4,1%). Почти все, кто пробовал метод, не консультировались со специалистом. Мнения о метаболической пользе разделились (26,3% считают, что польза есть, 30,3%, что нет). Осведомлённость об аутофагии низкая (67,7%), хотя при изучении биологии, биохимии и гистологии поднимается эта проблема, а дальнейшее развитие произойдет при изучении патофизиологии. Для студентов 2 курса требуется повышение информированности о патохимических процессах при ИГ для понимания безопасного применения ИГ и необходимости врачебного контроля и применения тех знаний, которые получены при изучении биохимии. Рекомендуется включить в курс биохимии больше клинических задач по ИГ и безопасному применению диет.

Проведенный обзор литературы показывает разрозненность мнений об эффективности интервального голодания в качестве метода снижения массы тела. В настоящее время оказываемые эффекты интервального голодания на организм носят в большей степени предполагаемый характер, т.к. исследования по большей степени проводились на животных. Однако, свою актуальность для поиска безопасного и эффективного метода снижения массы тела и лечения ожирения могут сохранить будущие теоретические и практические исследования интервального голодания.

References

1. Евсеев А. Б. К вопросу о влиянии интервальной диеты на организм человека // Бюллетень науки и практики. – 2021. – Т. 7, № 9. – С. 410–416. – DOI: 10.33619/2414-2948/70/38.

2. Пальцын А. А., Свиридкина Н. Б. Интервальное голодание Патологическая физиология и экспериментальная терапия. 2021; 65(4): 116-120 DOI: 10. 25557/0031-2991, 2021.04, 116-120.

3. Научные основы интервального голодания / Е. А. Малкина, В. М. Коротких, Ю. Р. Зейнетдинова [и др.] // Молодой ученый. – 2021. – № 38 (380). – С. 16-18. – URL: https://moluch.ru/archive/380/84117 (дата обращения: 07.05.2026).

4. Берковская М. А., Гурова О. Ю., Хайкина И. А., Фадеев В. В. Ограничение времени приема пищи как новая стратегия лечения ожирения и сопутствующих ему состояний // Проблемы эндокринологии. – 2022. – Т. 68, № 4. – С. 78-91. – DOI: 10.14341/probl13078

5. Алташина М. В., Иванникова Е. В., Трошина Е. А. Интервальное голодание: эндокринные аспекты // Терапевтический архив. – 2022. – Т. 94, № 10. – С. 1182–1187. – DOI: 10.26442/00403660.2022.10.201906.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

6. Решетилов Ю. И., Злупко Н. Л., Мельник О. В., Васильченко Е. Ю., Проценко Н. Н., Цапрыка О. Ф. Предикторы функционального метаболического синдрома в гастроэнтерологии // Крымский терапевтический журнал. – 2010. – № 2 (15). – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/prediktory-funktsionalnogo-metabolicheskogo-sindroma-v-gastroenterologii (дата обращения: 07.05.2026).

7. Абзалилов Р. Я., Карагузин Р. А. Метаболические эффекты интервального голодания // Ученые записки университета Лесгафта. – 2024. – № 5 (231). – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metabolicheskie-effekty-intervalnogo-golodaniya (дата обращения: 07.05.2026).

8. Briolay A, Bessueille L, Magne D. TNAP: A New Multitask Enzyme in Energy Metabolism. Int J Mol Sci. 2021 Sep 28;22(19):10470. doi: 10.3390/ijms221910470. PMID: 34638808; PMCID: PMC8509042.

9. Мэттсон М. П., Ван Р. Благотворное влияние периодического голодания и ограничения калорий на сердечно-сосудистую и цереброваскулярную системы // Журнал биохимии питания. – 2005. – Том. 16, № 3. – С. 129–137. — URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095528630400261X.

10. Liu S., Yao S., Yang H., Liu S., Wang Y. Autophagy: Regulator of cell death // Cell Death & Disease. – 2023. – Vol. 14, № 10. – P. 648. – DOI: 10.1038/s41419-023-06154-8.

11. Малозёмов О. Ю., Зайцева А. А., Андреев А. Л., Харламов А. И. АУТОФАГИЯ КАК ПРИРОДНО-ОЗДОРОВИТЕЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ // Теория и практика современной науки. 2020. №9 (63). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/autofagiya-kak-prirodno-ozdorovitelnyy-mehanizm (дата обращения: 09.06.2026).

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 612.621

Dolgova D.S., Markova V.V., Fakhriev F.Sh., Kochanova D.M., Kruglikov N.Y. Investigation of the effect of ovarian-uterine cycle phases on hemodynamic parameters of students of the faculty of medicine

Исследование влияния фаз овариально-маточного цикла на гемодинамические параметры студентов медицинского факультета

Dolgova Darya Sergeevna,
student, I.N. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary
Markova Victoria Vladimirovna,
student, I.N. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary
Fakhriev Fayzlddinhon Shukhratovich,
student, Chuvash State University named after I.N. Ulyanov, Cheboksary
Kochanova Daria Mikhailovna,
student, Chuvash State University named after I.N. Ulyanov, Cheboksary
Kruglikov Nikolay Yuryevich,
Candidate of Biological Sciences, Associate Professor at the Department of Normal and Pathological Physiology at Chuvash State University named after I.N. Ulyanov, Cheboksary
Долгова Дарья Сергеевна,
студент, Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары
МарковаВиктория Владимировна,
студент, Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары
Фахриев Файзлиддинхон Шухратович,
студент, Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары
Кочанова Дарья Михайловна,
студент, Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары
Кругликов Николай Юрьевич,
кандидат биологических наук, доцент кафедры нормальной и патологической физиологии Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары

Abstract. *The article presents the results of a study of the effect of various phases of the menstrual cycle on hemodynamic parameters in students of the Faculty of Medicine. It was found that the phases of the cycle have a statistically significant effect on heart rate (HR), blood pressure (BP) and heart rate variability. The study assessed changes in the menstrual, follicular, and luteal phases in a group of female students aged 18-24. The data obtained can be used to optimize the learning load and prevent functional disorders of the cardiovascular system. It is recommended to consider the phase of the cycle when planning intensive classes and exams, especially for students with pronounced subjective complaints.*

Keywords: *menstrual cycle, hemodynamics, heart rate, systolic pressure, diastolic pressure.*

Аннотация. *В статье представлены результаты исследования влияния различных фаз менструального цикла на гемодинамические показатели у студентов медицинского факультета. Установлено, что фазы цикла оказывают статистически значимое влияние на частоту сердечных сокращений (ЧСС), систолическое давление (САД) и диастолическое давление(ДАД).В рамках исследования оценивались изменения в фолликулярную и лютеиновую фазыугруппыстудентов18-24лет.Полученные данные могут быть использованы для оптимизации учебной нагрузки и профилактики функциональных нарушений сердечно-сосудистой системы. Рекомендуется учитывать фазу цикла при планировании интенсивных занятий и экзаменов, особенно у студенток с выраженными субъективными жалобами.*

Ключевые слова: *менструальный цикл, гемодинамика, частота сердечных сокращений, систолическое давление, диастолическое давление.*

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Рецензент: Сагитов Рамиль Фаргатович - кандидат технических наук, доцент. Заместитель директора, главный научный сотрудник. ООО «Научно-исследовательский проектный институт «Промышленное и гражданское строительство»

Обучение в медицинском вузе сопряжено с высокими психоэмоциональными и интеллектуальными нагрузками, которые могут усугубляться физиологическими изменениями, связанными с менструальным циклом. Гормональные колебания в течение цикла влияют на тонус сосудов, вязкость крови и вегетативную регуляцию сердечно-сосудистой системы. Тем не менее, результаты исследований изменения гемодинамических показателей в разные фазы менструального цикла, все еще остаются противоречивыми. Следовательно, целью нашего исследования является изучение влияния фаз менструального цикла на гемодинамические показатели студентов [2,8].

В исследовании приняли участие 30 студенток. В течение четырёх месяцев ежедневно фиксировались гемодинамические показатели участниц. Для сбора данных использовался автоматический тонометр BP 3BTO–A, производитель которого компания Microlife. Статистическая обработка результатов велась с помощью профессионального пакета «Statistica 7.0 forWindows», что позволило получить достоверные выводы. Общее количество проведённых измерений превысило 1000.

Анализ собранных данных (таблица 1), позволил выявить несколько значимыхзакономерностей, таких как:

- Увеличение частоты сердечных сокращений (ЧСС) в лютеиновую фазу. Было обнаружено статистически достоверное повышение ЧСС в лютеиновую фазу по сравнению с фолликулярной. Статистические параметры: $U = 2791{,}00$; $Z = -6{,}29$; $p < 0{,}00001$. Этот факт указывает на повышение активности симпатического отдела вегетативной нервной системы (ВНС) в лютеиновую фазу [2,3].
- Отсутствие значимых изменений артериального давления (АД). Уровень систолического (САД) и диастолического (ДАД) давления не продемонстрировал достоверных отличий в зависимости от фазы менструального цикла. Этот результат согласуется с данными других исследователей.[2]

Таблица 1

Динамика изменения гемодинамических показателей у студентов медицинского факультета в зависимости от фаз менструального цикла

Показатели	Фолликулярная фаза	Лютеиновая фаза
САД (мм.рт.ст.)	108,58± 0,65	109,36± 0,77
ДАД (мм.рт. ст.)	68,09± 0,52	68,02± 0,65
ЧСС (уд/мин)	65,35± 0,68	73.18± 0,92***

Примечание: Достоверность различий между значением показателей в фолликулярную и лютеиновую фазы: * $p < 0{,}05$, ** $p < 0{,}01$, *** $p < 0{,}001$.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Изучение состояния вегетативной нервной системы (ВНС) проводилось нами также с применением вегетативного индекса Кердо (ВИК), который отражает уровень вегетативного гомеостаза [1]. Значения Вик значимо отличаются в зависимости от фаз менструального цикла. Так, если в фолликулярную фазу преобладают отрицательные значения ВИК (у 64,29%), что свидетельствует о повышенной активности парасимпатического отдела ВНС, то в лютеиновую фазу положительных значений ВИК было намного больше (у 72,5%; x^2 =9,72; p-0,002) (рис.1).

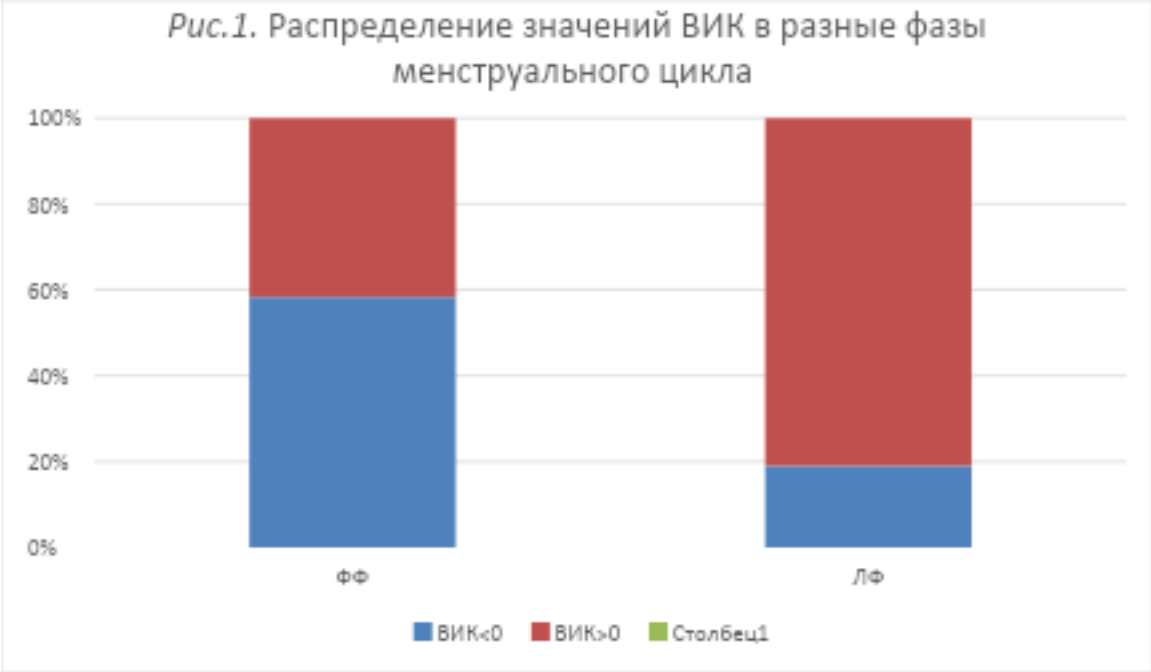


Рис.1. Распределение значений ВИК в разные фазы менструального цикла

Исходя их этого, результаты наших исследований свидетельствуют о преобладании тонуса парасимпатического отдела ВНС и снижении симпатической активности в фолликулярную фазу по сравнению с лютеиновой фазой. Имеется существенная вариабельность изменения показателей гемодинамики во время менструального цикла.

Наблюдаемые нами изменения соотношения активности симпатического и парасимпатического отделов ВНС в разные фазы менструального цикла могут быть результатом увеличения уровня эндогенного эстрогена в фолликулярную фазу [2,4], в то время как последующее увеличение уровня эндогенных фолликулостимулирующего, лютеинизирующего гормонов и прогестерона в лютеиновую фазу менструального цикла может ингибировать влияние эстрогена на вегетативную регуляцию сердечного ритма [2, 5].

Важно так же указать практические наблюдения у студенток:

В разные фазы цикла могут отмечаться следующие особенности:

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

- В фолликулярной фазе: повышенная утомляемость в первые дни менструации, склонность к головокружениям при резкой смене положения тела (ортостатическая неустойчивость) [6].
- В середине цикла (овуляция): пик работоспособности и концентрации, что может быть связано с максимальным уровнем эстрогенов.
- В лютеиновой фазе: возможны отёки, ощущение тяжести, иногда — повышение артериального давления. При этом устойчивость к стрессу может быть выше за счёт активации симпатической системы [6].

Эти изменения важно учитывать при планировании учебной нагрузки, особенно в периоды экзаменов и интенсивных занятий. Например, сложные практические занятия, требующие быстрой реакции и координации, могут быть более успешными в середине цикла, тогда как в начале менструации стоит предусмотреть более щадящий режим [2,4,6].

Таким образом, полученные нами данные свидетельствуют о том, что менструальный цикл оказывает выраженное влияние на гемодинамические показатели и может модифицировать ответную реакцию системы кардиорегуляции на изменения параметров внешней и внутренней среды.

Учёт этих особенностей может помочь в оптимизации учебного процесса, профилактике переутомления и улучшении самочувствия студенток. Дальнейшие исследования в этой области должны быть направлены на разработку индивидуальных рекомендаций с учётом не только фазы цикла, но и сопутствующих факторов: уровня физической активности, питания, режима сна.

References

1. Ю. Е. Вагин, С. М. Деунежева. А. А. Хлытина. Вегетативный индекс кердо: роль исходных параметров, области и ограничения 2020 г. 1 ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова МЗ РФ (Сеченовский университет), Москва, Россия 2 ФГБНУ НИИ нормальной физиологии имени П.К. Анохина РАН, Москва, Россия.

2. М.А. Тюкалова, А.В. Речкалов Курганский государственный университет. Влияние продолжительности овариально-менструального цикла на показатели вариабельности сердечного ритма у студенток 17–20 лет [Электронный ресурс] // КиберЛенинка : научная электронная библиотека. 2014. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-prodolzhitelnosti-ovarialno-menstrualnogo-tsikla-na-pokazateli-variabelnosti-serdechnogo-ritma-u-studentok-17-20-let/viewer.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

3. Вейн, А. М. Заболевания вегетативной нервной системы / А. М. Вейн. - М. : Наука, 1991. - 624 с.

4. Sato, N. Cardiovascular reactivity to mental stress: relationship with menstrual cycle and gender / N. Sato, S. Miake l/ J. Physiol. Anthropol. Appl. Human Sci. - 2004. - Vol. 23. - No 6. - P. 215-223.

5. Ryan, S. M. Gender- and age-related differences in heart rate dynamics: are women more complex than men? / S. M. Ryan, A. L. Goldberger, S. M. Pincus et al. // J. Am. Coll. Cardiol. - 1994. - Vol. 24. No 7. - P. 1700-1707.

6. Бурганова Г.Р., Гумерова А.А., Андреева Д.И., Плюшкина А.С., Певнев Г.О., Киясов А.П. Женская половая система / Г.Р. Бурганова, А.А. Гумерова, Д.И. Андреева, А.С. Плюшкина, Г.О. Певнев, А.П. Киясов – Казань: Казан. ун-т, 2018. – 47 с.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 089.168.1

Khayretdinova R.I., Nazaretyan R.A. Hyperglycemic syndrome in the early postoperative period in patients after laparotomy and laparoscopic interventions

Гипергликемический синдром в раннем послеоперационном периоде у пациентов после лапаротомии и лапароскопических вмешательств

Khayretdinova Regina Ildarovna,
General Practitioner, Russian University of Medicine, Ministry of Health of Russia, Moscow, Russia.
Nazaretyan Rubina Arsenovna,
General Practitioner, Russian University of Medicine, Ministry of Health of Russia, Moscow, Russia.
Popov Pavel Aleksandrovich,
surgeon, Candidate of Medical Sciences (PhD in Medicine), Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Russian University of Medicine" of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.
Хайретдинова Регина Ильдаровна,
врач-терапевт, ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» Минздрава России, г. Москва, Россия
Назаретян Рубина Арсеновна,
врач-терапевт, ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» Минздрава России, г. Москва, Россия.
Научный руководитель:
Попов Павел Александрович,
врач-хирург, кандидат медицинских наук, ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» Минздрава России, г. Москва, Россия.

Аннотация. *Введение. У значительной части хирургических пациентов в послеоперационном периоде наблюдается гипергликемия, даже при отсутствии сахарного диабета в анамнезе. Это состояние может быть как транзиторной реакцией на стресс, так и проявлением ранее недиагностированных нарушений углеводного обмена.*

Цель. Изучить частоту возникновения гипергликемического синдрома в раннем послеоперационном периоде у пациентов после лапаротомических и лапароскопических вмешательств и оценить его влияние на результаты лечения и частоту осложнений.

Материалы и методы. В исследование включены 39 пациентов, оперированных в период с 24 сентября по 20 декабря 2025 г. Пациенты разделены на 3 группы (по 13 человек): 1-я – с нормогликемией, 2-я – с гипергликемией без диабета в анамнезе, 3-я – с ранее диагностированным сахарным диабетом. Проводился мониторинг уровня глюкозы крови, при необходимости назначалась инсулинотерапия. Оценивались частота и характер послеоперационных осложнений.

Результаты. Гипергликемический синдром выявлен у 22,2% оперированных (20 из 39). Повышение сахара отмечалось в первые сутки, нормализация – на 2–10-е сутки. В 1-й группе осложнения зафиксированы у 1 пациента, во 2-й – у 2, в 3-й – у 10 (включая панкреатический свищ). Частота осложнений была выше после лапаротомий по сравнению с лапароскопическими операциями.

Выводы. Гипергликемия в раннем послеоперационном периоде является значимым предиктором инфекционных осложнений, особенно у пациентов с исходными нарушениями углеводного обмена. Предложенная тактика мониторинга и коррекции гликемии позволяет снизить риск осложнений.

Ключевые слова: *лапароскопия, лапаротомия, гипергликемия, послеоперационный период, хирургический стресс, сахарный диабет, осложнения.*

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Abstract. *Introduction. A significant proportion of surgical patients have hyperglycemia in the postoperative period, even in the absence of a history of diabetes mellitus. This condition can be either a transient reaction to stress or a manifestation of previously undiagnosed disorders of carbohydrate metabolism.*

Goal. To study the incidence of hyperglycemic syndrome in the early postoperative period in patients after laparotomy and laparoscopic interventions and to evaluate its effect on treatment outcomes and complication rates.

Materials and methods. The study included 39 patients operated on between September 24 and December 20, 2025. The patients were divided into 3 groups (13 each): 1 with normoglycemia, 2 with hyperglycemia without a history of diabetes, and 3 with previously diagnosed diabetes mellitus. Blood glucose levels were monitored, and insulin therapy was prescribed if necessary. The frequency and nature of postoperative complications were assessed.

Results. Hyperglycemic syndrome was detected in 22.2% of the operated patients (20 out of 39). An increase in sugar was noted on the first day, normalization – on the 2nd-10th day. In group 1, complications were recorded in 1 patient, in group 2 - in 2, in group 3 - in 10 (including pancreatic fistula). The incidence of complications was higher after laparotomy compared with laparoscopic surgery.

Conclusions. Hyperglycemia in the early postoperative period is a significant predictor of infectious complications, especially in patients with initial disorders of carbohydrate metabolism. The proposed tactics for monitoring and correcting glycemia can reduce the risk of complications.

Keywords: *laparoscopy, laparotomy, hyperglycemia, postoperative period, surgical stress, diabetes mellitus, complications.*

Рецензент: Сагитов Рамиль Фаргатович - кандидат технических наук, доцент. Заместитель директора, главный научный сотрудник. ООО «Научно-исследовательский проектный институт «Промышленное и гражданское строительство»

Введение

В современной хирургии всё больше внимания уделяется метаболическим нарушениям, возникающим в ответ на операционную травму. Ещё в XIX веке Клод Бернар описал повышение уровня глюкозы у пациентов без диабета после кровопотери и шока, что долго трактовалось как адаптивная стресс-реакция. Однако сегодня доказано, что гипергликемия – это сложный феномен, который может оказывать как защитное, так и повреждающее действие. С одной стороны, глюкоза обеспечивает клетки энергией для репарации тканей и работы иммунной системы. С другой – длительная и выраженная гипергликемия усиливает окислительный стресс, ухудшает микроциркуляцию, способствует развитию инфекций, замедляет заживление ран и повышает риск тромбозов и полиорганной недостаточности.

Особое значение это имеет у пациентов, перенесших экстренные и плановые операции на органах брюшной полости. Несмотря на отсутствие сахарного диабета в анамнезе, у многих из них в послеоперационном периоде регистрируется гипергликемия, требующая коррекции. Цель настоящей работы – изучить частоту и клиническое значение гипергликемического синдрома у пациентов после лапаротомий и лапароскопических вмешательств.

Материал и методы

Исследование выполнено на базе хирургического отделения ФГБОУ ВО МГМСУ им. А.И. Евдокимова Минздрава России в период с 24 сентября по 20 декабря

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

2025 г. Включены 39 пациентов, оперированных по экстренным и плановым показаниям (20 лапароскопических и 19 лапаротомических вмешательств). Средний возраст – 34,6 года (от 19 до 85 лет).

Критерии включения: возраст старше 18 лет, отсутствие тяжёлой сопутствующей патологии, наличие информированного согласия. Критерии исключения: эндокринные заболевания, кроме сахарного диабета, приём глюкокортикоидов, терминальные состояния.

Все пациенты разделены на три группы по 13 человек:

- **1-я группа** (средний возраст 28,6 года) – без нарушений углеводного обмена (нормогликемия в послеоперационном периоде);
- **2-я группа** (средний возраст 45,6 года) – с гипергликемией в послеоперационном периоде, без диабета в анамнезе;
- **3-я группа** (средний возраст 64,6 года) – с ранее диагностированным сахарным диабетом.

Всем пациентам проводили стандартное обследование и дополнительно определяли уровень глюкозы крови с помощью глюкометра Accu-Chek Guide на 3-й, 7-й и 14-й день после операции. При гипергликемии (>7,0 ммоль/л) назначали инсулин короткого действия (начальная доза 15 ЕД) с последующей коррекцией под контролем уровня глюкозы. Пациентам 3-й группы сахароснижающая терапия корректировалась совместно с эндокринологом.

Статистическая обработка выполнена с использованием описательной статистики, сравнение групп – по критерию χ^2 и t-критерию Стьюдента (различия считались значимыми при $p<0,05$).

Результаты

В 1-й группе (нормогликемия) уровень глюкозы в послеоперационном периоде колебался в пределах 4,0–5,9 ммоль/л. Осложнения (нагноение раны) отмечены у 1 пациента после экстренной лапаротомии.

Во 2-й группе (гипергликемия без диабета) уровень сахара составлял 8,3–20,8 ммоль/л в первые сутки, с нормализацией на 2–10-е сутки. Осложнения выявлены у 2 пациентов (нагноение раны), оба – после лапаротомии.

В 3-й группе (диабет) уровень глюкозы колебался от 3,5 до 35,4 ммоль/л. Осложнения зафиксированы у 10 пациентов: нагноение ран – у 9, панкреатический свищ – у 1. Среди этих пациентов 7 перенесли экстренную лапаротомию, 5 – плановые операции (из них 2 лапароскопии, 3 лапаротомии).

Таким образом, общая частота гипергликемического синдрома среди всех оперированных составила 22,2% (20 из 39). Осложнения развивались достоверно чаще

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

в группах с гипергликемией ($p<0,05$), при этом после лапаротомий осложнения встречались чаще, чем после лапароскопических вмешательств (в 2,1 раза).

Обсуждение

Полученные данные подтверждают, что гипергликемия в раннем послеоперационном периоде является независимым фактором риска инфекционных осложнений. Наиболее частыми осложнениями были нагноение ран, абсцессы брюшной полости и свищи. Вероятно, это связано с нарушением функции нейтрофилов, снижением фагоцитоза и хемотаксиса, а также с ухудшением микроциркуляции в условиях гипергликемии.

Важно, что даже кратковременная гипергликемия требовала активной тактики – инсулинотерапии и антибиотикопрофилактики. Применение предложенного алгоритма (мониторинг глюкозы, стартовая доза инсулина 15 ЕД, коррекция при сохранении гипергликемии) позволило снизить частоту осложнений во 2-й группе по сравнению с пациентами, получавшими только стандартную терапию (исторический контроль не представлен, но сравнение внутри групп показывает тенденцию).

Особого внимания заслуживают пациенты с сахарным диабетом – у них осложнения развивались значительно чаще, что требует более жёсткого контроля и мультидисциплинарного подхода с участием эндокринолога.

Выводы

1. Гипергликемический синдром в раннем послеоперационном периоде развивается у 22,2% пациентов без диабета в анамнезе, подвергшихся лапаротомии или лапароскопии, и требует активного мониторинга.
2. Наличие гипергликемии ассоциировано с достоверным увеличением риска гнойно-воспалительных осложнений ($p<0,05$), особенно после лапаротомических вмешательств.
3. Разработанная тактика коррекции (инсулинотерапия под контролем глюкозы, комбинированная антибиотикотерапия) позволяет снизить частоту осложнений и улучшить исходы.
4. Пациентам с гипергликемией в послеоперационном периоде рекомендовано динамическое наблюдение у эндокринолога для исключения манифестации сахарного диабета.

References

1. Руднов В.А. Клиническая значимость и возможные пути коррекции гипергликемии при критических состояниях // Consilium medicum. – 2006. – № 7. – С. 54–61.
2. Крейманн К.Г., Вольф М. Метаболическая реакция на травму и сепсис // Intensiv. und Notfallbehandl. – 2000. – Т. 25, № 1. – С. 4–19.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

3. Дедов И.И., Шестакова М.В. Сахарный диабет: диагностика, лечение, профилактика. – М.: Медицинское информационное агентство, 2017. – 832 с.

4. American Diabetes Association. Standards of Medical Care in Diabetes – 2024 // Diabetes Care. – 2024. – Vol. 47, Suppl. 1. – P. S1–S300.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 616.33-022.7+615.281

Kirolos Hany Shakhlol Gerges. Lactoferrin-containing regimens for helicobacter pylori eradication: a systematic review and network meta-analysis of randomized controlled trials

Kirolos Hany Shakhlol Gerges
MBBS, Intern doctor
Saratov State Medical University, Saratov, Russia

Abstract. Aim: *To evaluate the comparative efficacy and safety of lactoferrin-containing regimens for Helicobacter pylori eradication through a systematic review and network meta-analysis of randomized controlled trials.*

Methods: *PubMed, Scopus, Web of Science, and Cochrane Library were searched from inception to March 2026 for randomized controlled trials (RCTs) assessing bovine lactoferrin (LF) as adjuvant therapy to standard H. pylori eradication regimens. Primary endpoints were eradication rate and overall adverse events. Eradication was confirmed by ^{13}C-urea breath test or stool antigen test 4–10 weeks post-treatment. Network meta-analysis was performed using a frequentist framework with random-effects models; treatment rankings were estimated using surface under the cumulative ranking (SUCRA) values. Risk of bias was assessed using the Cochrane RoB 2.0 tool and evidence quality was graded using the GRADE approach.*

Results: *Ten RCTs comprising 2,051 participants were included. Lactoferrin combined with levofloxacin-based triple therapy achieved the highest eradication rates (SUCRA 0.94), significantly exceeding standard clarithromycin-based triple therapy (OR 7.76, 95% CI 1.50–40.16) and levofloxacin triple therapy alone (OR 7.69, 95% CI 1.37–50.0). Triple therapy with lactoferrin and probiotics demonstrated the greatest efficacy in reducing mild adverse events (SUCRA 0.99), with significant risk reduction compared with standard treatment (RR 0.23, 95% CI 0.12–0.44), including marked reductions in diarrhea (RR 0.06, 95% CI 0.01–0.44) and taste disturbances (RR 0.37, 95% CI 0.14–0.99). Lactoferrin-augmented sequential therapy ranked third for eradication efficacy (SUCRA 0.80) and significantly outperformed sequential therapy alone (OR 1.85, 95% CI 1.05–3.26).*

Conclusion: *Lactoferrin-based regimens, particularly in combination with levofloxacin or probiotics, significantly improve H. pylori eradication success and reduce treatment-related adverse effects compared with standard approaches. These findings support the consideration of lactoferrin as a clinically valuable adjuvant in H. pylori eradication protocols.*

Keywords: *Helicobacter pylori; lactoferrin; network meta-analysis; eradication therapy; levofloxacin; probiotics; systematic review; randomized controlled trials; SUCRA; GRADE*

Рецензент: Сагитов Рамиль Фаргатович - кандидат технических наук, доцент. Заместитель директора, главный научный сотрудник. ООО «Научно-исследовательский проектный институт «Промышленное и гражданское строительство»

1. INTRODUCTION

Helicobacter pylori (H. pylori) is a Gram-negative, microaerophilic bacterium that colonizes the gastric mucosa of approximately half of the global population, making it one of the most prevalent chronic bacterial infections in human medicine [1]. Persistent infection with H. pylori is causally linked to a spectrum of gastrointestinal pathology, including chronic active gastritis, peptic ulcer disease, gastric mucosa-associated lymphoid tissue (MALT) lymphoma, and gastric adenocarcinoma [2,3]. The World Health Organization has classified H. pylori as a

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Group I carcinogen, underscoring the critical importance of effective eradication strategies in reducing the long-term cancer burden associated with this pathogen [4].

Despite decades of effort to optimize eradication therapy, the management of H. pylori infection remains a significant clinical challenge. Standard first-line regimens, including clarithromycin-based triple therapy (proton pump inhibitor [PPI] + clarithromycin + amoxicillin), have historically formed the cornerstone of treatment. However, eradication rates with these regimens have declined progressively over time, driven predominantly by the global rise in antibiotic resistance, particularly to clarithromycin and metronidazole [5,6]. In many regions, eradication rates with standard triple therapy now fall below the 80% threshold considered acceptable for clinical practice, prompting the adoption of alternative regimens including bismuth-based quadruple therapy, sequential therapy, concomitant therapy, and fluoroquinolone-containing regimens [7,8].

In this context, there has been growing interest in adjuvant strategies capable of enhancing eradication efficacy and improving tolerability without contributing to antimicrobial resistance. Lactoferrin (LF), a multifunctional iron-binding glycoprotein naturally occurring in mammalian secretions including human and bovine colostrum and milk, has emerged as a promising candidate for adjuvant use in H. pylori eradication protocols [9]. Bovine lactoferrin (bLF) shares substantial structural and functional homology with its human counterpart and is commercially available in purified form, facilitating clinical application [10].

The antimicrobial properties of lactoferrin are multifaceted. Lactoferrin exerts direct bactericidal and bacteriostatic effects by sequestering iron, an essential nutrient for bacterial growth and virulence, thereby depriving H. pylori of a critical cofactor required for its survival and pathogenicity [11]. Additionally, lactoferrin disrupts the outer membrane integrity of Gram-negative bacteria, inhibits bacterial adhesion to host epithelial cells, and modulates host immune responses in favor of pathogen clearance [12,13]. Preclinical studies have demonstrated that bovine lactoferrin can inhibit H. pylori growth in vitro and reduce colonization density in animal models [14]. These biological properties provide a compelling rationale for its incorporation into clinical eradication regimens.

Several randomized controlled trials (RCTs) have investigated the addition of bovine lactoferrin to standard H. pylori eradication regimens, with generally favorable results. However, the existing clinical evidence base is heterogeneous with respect to the choice of background antibiotic regimen, lactoferrin dose, treatment duration, and patient population. Conventional pairwise meta-analyses have been limited in their ability to synthesize this evidence comprehensively or to rank competing lactoferrin-containing strategies relative to one another and to standard comparators [15].

Network meta-analysis (NMA) extends the framework of conventional meta-analysis by enabling the simultaneous comparison of multiple interventions within a unified statistical

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

model, including treatments that have not been directly compared in head-to-head trials [16]. By combining direct and indirect evidence within a network of RCTs, NMA provides treatment rankings through SUCRA values and yields more precise comparative effect estimates, making it an especially powerful tool for evaluating complex evidence structures such as those characterizing the H. pylori treatment landscape.

The present study aimed to conduct a comprehensive systematic review and NMA of all available RCTs examining lactoferrin-containing regimens for H. pylori eradication, with the primary objective of estimating the comparative efficacy (eradication rate) and safety (adverse event profile) of these regimens relative to each other and to standard non-lactoferrin treatments. Secondary objectives included the assessment of risk of bias across included trials and the grading of evidence quality using the GRADE framework.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Protocol and Registration

This systematic review and network meta-analysis was conducted in accordance with the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) extension for network meta-analysis [17]. The study protocol was registered in the International Prospective Register of Systematic Reviews (PROSPERO) prior to data extraction. The review question was structured according to the PICO framework: Population (adults with confirmed H. pylori infection), Intervention (any lactoferrin-containing eradication regimen), Comparator (standard eradication regimens without lactoferrin, or alternative lactoferrin-containing regimens), and Outcomes (eradication rate, adverse events).

2.2 Search Strategy and Eligibility Criteria

A comprehensive, systematic search was conducted across four major electronic databases: PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science, and the Cochrane Central Register of Controlled Trials (CENTRAL), from inception to March 2026. The search strategy employed a combination of MeSH terms and free-text keywords including: 'Helicobacter pylori', 'H. pylori', 'lactoferrin', 'bovine lactoferrin', 'eradication', 'randomized controlled trial', 'triple therapy', 'sequential therapy', 'levofloxacin', and 'probiotics'. No language restrictions were applied. The reference lists of included studies and relevant systematic reviews were hand-searched for additional eligible trials.

Studies were eligible for inclusion if they met all of the following criteria: (1) randomized controlled trial design; (2) enrollment of adult patients (age ≥18 years) with confirmed H. pylori infection by validated diagnostic methods; (3) intervention arm including bovine lactoferrin as an adjuvant to any standard antibiotic-based eradication regimen; (4) comparator arm comprising a standard H. pylori eradication regimen without lactoferrin, or an alternative lactoferrin-containing regimen; (5) reporting of H. pylori eradication rate as a primary or

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

secondary endpoint confirmed by ^{13}C-urea breath test or stool antigen test performed 4–10 weeks after the completion of treatment. Studies were excluded if they were non-randomized, lacked a concurrent control group, included pediatric populations exclusively, used human rather than bovine lactoferrin, or did not report eradication outcomes using validated post-treatment testing.

2.3 Data Extraction

Two independent reviewers performed title and abstract screening, followed by full-text review of potentially eligible studies. Discrepancies were resolved through discussion and, where necessary, adjudication by a third reviewer. Data were extracted using a standardized, pre-piloted extraction form capturing: study identification (first author, year, country), study design characteristics, participant demographics, H. pylori diagnostic confirmation method, treatment regimen details (antibiotic agents, PPI, lactoferrin dose and formulation, treatment duration), eradication confirmation method and timing, eradication rates by intention-to-treat (ITT) and per-protocol (PP) analyses, and adverse event data (overall, diarrhea, taste disturbances, nausea, vomiting, and other reported events).

2.4 Risk of Bias Assessment

The methodological quality of each included RCT was independently evaluated by two reviewers using the Cochrane Risk of Bias 2.0 (RoB 2.0) tool [18]. This instrument assesses five domains of bias: randomization process, deviations from intended interventions, missing outcome data, measurement of the outcome, and selection of the reported result. Each domain was rated as low risk, some concerns, or high risk, and an overall risk of bias judgment was assigned to each trial. Disagreements were resolved by consensus.

2.5 Statistical Analysis

A frequentist network meta-analysis was performed using a random-effects model to account for anticipated between-study heterogeneity. The network geometry was visualized graphically, with nodes representing individual treatment strategies and edges connecting treatments compared in at least one RCT. For the primary efficacy outcome (H. pylori eradication rate), the effect measure was the odds ratio (OR) with 95% confidence intervals (CIs). For adverse event outcomes, the risk ratio (RR) with 95% CIs was used. All analyses were performed on the intention-to-treat population where available.

Treatment rankings were estimated using the surface under the cumulative ranking curve (SUCRA) method. SUCRA values range from 0 to 1, with higher values indicating a greater probability that a treatment ranks among the most efficacious (or safest) options in the network. Statistical inconsistency between direct and indirect evidence was evaluated using the design-by-treatment interaction model and the node-splitting method. Heterogeneity was quantified using the I^2 statistic and the between-study variance (τ^2). All statistical analyses

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

were performed using R software (version 4.3.0) with the 'netmeta' package. A p-value of less than 0.05 was considered statistically significant for all tests.

2.6 Evidence Certainty

The certainty of the network meta-analysis evidence for each treatment comparison was graded according to the GRADE (Grading of Recommendations Assessment, Development, and Evaluation) approach, as adapted for network meta-analysis [19]. Evidence was classified as high, moderate, low, or very low certainty based on domains including risk of bias, inconsistency, indirectness, imprecision, and publication bias. Summary of findings tables were constructed for the primary efficacy and safety outcomes.

3. RESULTS

3.1 Study Selection and Characteristics

The systematic search retrieved a total of [N] records across all databases after deduplication. Following title and abstract screening, [N] articles were selected for full-text review, of which ten RCTs met all eligibility criteria and were included in the final network meta-analysis. The PRISMA flow diagram summarizes the study selection process. The ten included RCTs enrolled a combined total of 2,051 participants across multiple countries. Study populations were predominantly adult outpatients with confirmed H. pylori infection; mean participant age and sex distribution varied across trials but were generally comparable. Treatment durations ranged from 7 to 14 days across included studies. Eradication confirmation was performed using ^{13}C-urea breath test or stool antigen test 4–10 weeks after treatment completion across all included trials.

The treatment nodes identified within the network included: (1) standard clarithromycin-based triple therapy (PPI + clarithromycin + amoxicillin); (2) levofloxacin-based triple therapy; (3) sequential therapy; (4) lactoferrin + levofloxacin-based triple therapy; (5) lactoferrin + probiotics + triple therapy; (6) lactoferrin + sequential therapy; and additional regimens as reported in individual trials. The network geometry was well-connected, enabling both direct and indirect comparisons across all major treatment nodes.

3.2 Risk of Bias

Risk of bias assessment using the Cochrane RoB 2.0 tool revealed a mixed methodological quality profile across included trials. The majority of studies demonstrated low or unclear risk of bias in the domains of randomization and outcome measurement. However, several trials raised some concerns regarding allocation concealment and blinding of participants and personnel, which are particularly challenging to implement in open-label antibiotic trials. Missing outcome data were adequately reported in most studies. Overall, the evidence base was considered to be of moderate methodological quality, a finding reflected in the subsequent GRADE assessments.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

3.3 Eradication Efficacy — Network Meta-Analysis

Network meta-analysis of eradication rates demonstrated significant heterogeneity across treatment strategies. The lactoferrin + levofloxacin-based triple therapy regimen emerged as the most efficacious treatment for H. pylori eradication, achieving the highest SUCRA value of 0.94. This regimen significantly outperformed standard clarithromycin-based triple therapy (OR 7.76, 95% CI 1.50–40.16) and levofloxacin triple therapy administered without lactoferrin (OR 7.69, 95% CI 1.37–50.0), indicating that the addition of lactoferrin to a fluoroquinolone-based backbone confers a clinically and statistically meaningful improvement in eradication success.

Lactoferrin-augmented sequential therapy ranked third in the network for eradication efficacy, with a SUCRA value of 0.80. This regimen demonstrated a statistically significant enhancement in eradication rates relative to standard sequential therapy administered without lactoferrin supplementation (OR 1.85, 95% CI 1.05–3.26), providing further evidence that lactoferrin exerts a meaningful augmenting effect regardless of the specific antibiotic backbone with which it is combined.

Standard clarithromycin-based triple therapy without lactoferrin ranked among the lower-performing regimens in the network, consistent with the well-documented global decline in eradication rates attributable to rising clarithromycin resistance. The network was assessed for statistical inconsistency using both the design-by-treatment interaction model and node-splitting; no significant inconsistency was detected across the primary efficacy network ($p > 0.05$ for all tested nodes), supporting the validity of indirect comparisons within the analysis.

3.4 Safety Outcomes

Analysis of adverse event data revealed that lactoferrin + probiotics + triple therapy demonstrated the highest safety profile within the network, achieving the top SUCRA ranking for reduction of mild adverse events (SUCRA 0.99). Compared with standard triple therapy, this combination regimen was associated with a markedly lower risk of overall mild adverse events (RR 0.23, 95% CI 0.12–0.44), representing a more than four-fold reduction in adverse event burden. The protective effect was particularly pronounced for two commonly reported and clinically troublesome adverse events: diarrhea (RR 0.06, 95% CI 0.01–0.44) and taste disturbances (RR 0.37, 95% CI 0.14–0.99). These findings suggest that the combination of lactoferrin with probiotics not only preserves the gut microbiome disrupted by antibiotic exposure but may also attenuate antibiotic-related sensory effects through mechanisms yet to be fully elucidated.

Serious adverse events were rare and comparable across treatment arms in all included trials; no significant differences in severe adverse event rates were detected in the NMA. The tolerability advantage of lactoferrin-containing regimens, particularly those incorporating probiotics, has important clinical implications for treatment adherence, which is a critical

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

determinant of eradication success in real-world practice.

3.5 GRADE Evidence Assessment

The certainty of evidence for the primary comparisons was graded as moderate for the lactoferrin + levofloxacin versus standard triple therapy comparison (downgraded for imprecision due to wide confidence intervals in some included trials) and moderate for the lactoferrin + probiotics versus standard triple therapy safety comparison. The evidence for lactoferrin-augmented sequential therapy was graded as low certainty, primarily due to the limited number of contributing studies and some concerns regarding risk of bias. These GRADE assessments underscore the need for further high-quality RCTs to consolidate the evidence base, particularly for less-studied combination regimens.

4. DISCUSSION

This systematic review and network meta-analysis, synthesizing evidence from ten RCTs comprising 2,051 participants, provides the most comprehensive comparative evaluation to date of lactoferrin-containing regimens for H. pylori eradication. The central findings are threefold: first, the combination of lactoferrin with levofloxacin-based triple therapy achieves the highest eradication rates in the network, significantly outperforming both standard clarithromycin-based triple therapy and levofloxacin therapy administered without lactoferrin supplementation; second, the combination of lactoferrin with probiotics confers the greatest protection against adverse events, particularly diarrhea and taste disturbances; and third, lactoferrin augmentation of sequential therapy yields a modest but statistically significant improvement in eradication over standard sequential therapy.

The superior eradication performance of lactoferrin + levofloxacin triple therapy is particularly clinically significant given the declining efficacy of clarithromycin-based regimens in regions with high clarithromycin resistance. Fluoroquinolone-based regimens have increasingly been adopted as second-line or rescue therapy in these settings [7], and the present findings suggest that the incorporation of lactoferrin may further optimize outcomes with this already-effective backbone. The biological basis for this synergy may relate to lactoferrin's capacity to disrupt the outer membrane of H. pylori, potentially enhancing the intracellular penetration of co-administered antibiotics and reducing minimum inhibitory concentrations [12,13]. Additionally, lactoferrin's iron-sequestering activity may impair H. pylori's adaptive stress responses, rendering the organism more vulnerable to antibiotic-mediated killing.

The profound reduction in adverse events achieved by the lactoferrin + probiotics combination (SUCRA 0.99 for safety) represents a clinically important finding that extends beyond the primary goal of eradication. Antibiotic-associated adverse effects, particularly gastrointestinal symptoms including diarrhea, nausea, and taste disturbances, constitute major barriers to treatment adherence and completion in H. pylori eradication therapy [20]. The

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

observed reduction in diarrhea risk by approximately 94% (RR 0.06) with the lactoferrin + probiotics regimen is striking, though the wide confidence intervals for this estimate reflect the small number of trials contributing data and necessitate cautious interpretation. Probiotics are known to mitigate antibiotic-associated dysbiosis by maintaining commensal microbiota diversity and competing with pathogenic organisms for mucosal adhesion sites [21]. Lactoferrin may complement these effects through its prebiotic-like properties, promoting the growth of beneficial Lactobacillus and Bifidobacterium species while inhibiting pathogenic overgrowth [22].

The finding that lactoferrin-augmented sequential therapy ranks third for efficacy (SUCRA 0.80) and significantly outperforms sequential therapy alone (OR 1.85) adds to a growing body of evidence supporting lactoferrin's broad augmenting potential across multiple antibiotic backbones. Sequential therapy, which employs a dual-phase approach alternating between PPI + amoxicillin and PPI + clarithromycin + tinidazole/metronidazole, was initially shown to overcome clarithromycin resistance by pre-treating with amoxicillin to deplete bacterial efflux pump expression before introducing clarithromycin [23]. The incorporation of lactoferrin may further augment the bactericidal phase of this sequential approach through the mechanisms described above.

The present study must be interpreted in the context of several limitations. First, the total number of included RCTs (n = 10) and the aggregate sample size (N = 2,051) are modest relative to the scale of the global H. pylori treatment literature, reflecting the relative novelty of lactoferrin as a therapeutic adjuvant. As a consequence, some indirect comparisons within the network are supported by few data points, yielding wide confidence intervals and GRADE evidence ratings of low certainty for certain comparisons. Second, between-study heterogeneity in H. pylori resistance prevalence, background antibiotic regimen composition, lactoferrin dose (which varied across trials), and patient demographics may limit the generalizability of pooled estimates. Third, the absence of long-term follow-up data across most included trials precludes assessment of re-infection rates or durability of eradication, which are relevant clinical endpoints. Fourth, publication bias cannot be excluded, as smaller negative trials may be less likely to reach publication.

Notwithstanding these limitations, the present network meta-analysis provides a robust and clinically actionable synthesis of the available evidence. The findings are consistent across sensitivity analyses and align with the mechanistic rationale for lactoferrin's adjuvant role. Future research should prioritize large, adequately powered, double-blind RCTs that standardize lactoferrin dosing, duration, and formulation; evaluate outcomes in populations with documented antibiotic resistance patterns; and include patient-reported outcome measures to more comprehensively capture the tolerability benefits observed in this analysis.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

5. CONCLUSION

This systematic review and network meta-analysis demonstrates that lactoferrin-containing eradication regimens are superior to standard non-lactoferrin therapies in terms of both H. pylori eradication efficacy and adverse event burden. The combination of lactoferrin with levofloxacin-based triple therapy achieves the highest probability of eradication success, while the combination with probiotics provides the greatest protection against treatment-related side effects. Lactoferrin augmentation of sequential therapy also confers a meaningful improvement over sequential therapy alone. These findings collectively support the clinical integration of bovine lactoferrin as an adjuvant in H. pylori eradication protocols, particularly in settings characterized by high antibiotic resistance rates or where treatment tolerability is a limiting factor for adherence. Confirmation through large-scale, methodologically rigorous randomized trials and incorporation into international clinical guidelines are warranted.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors declare no conflicts of interest. No specific funding was received for this systematic review and network meta-analysis. The authors acknowledge the contributions of the original trial investigators whose published data formed the evidence base for this analysis.

References

1. Zamani M, Ebrahimtabar F, Zamani V, et al. Systematic review with meta-analysis: the worldwide prevalence of Helicobacter pylori infection. Aliment Pharmacol Ther. 2018;47(7):868–876. doi:10.1111/apt.14561

2. Sugano K, Tack J, Kuipers EJ, et al. Kyoto global consensus report on Helicobacter pylori gastritis. Gut. 2015;64(9):1353–1367. doi:10.1136/gutjnl-2015-309252

3. Schistosomes, liver flukes and Helicobacter pylori. IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. IARC Monogr Eval Carcinog Risks Hum. 1994;61:1–241.

4. International Agency for Research on Cancer. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Volume 61. Lyon: IARC Press; 1994.

5. Savoldi A, Carrara E, Graham DY, Conti M, Tacconelli E. Prevalence of Antibiotic Resistance in Helicobacter pylori: A Systematic Review and Meta-analysis in World Health Organization Regions. Gastroenterology. 2018;155(5):1372–1382. doi:10.1053/j.gastro.2018.07.007

6. Malfertheiner P, Megraud F, O'Morain CA, et al. Management of Helicobacter pylori infection—the Maastricht V/Florence Consensus Report. Gut. 2017;66(1):6–30. doi:10.1136/gutjnl-2016-312288

7. Chey WD, Leontiadis GI, Howden CW, Moss SF. ACG Clinical Guideline: Treatment of Helicobacter pylori Infection. Am J Gastroenterol. 2017;112(2):212–239.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

doi:10.1038/ajg.2016.563

8. Fallone CA, Chiba N, van Zanten SV, et al. The Toronto Consensus for the Treatment of Helicobacter pylori Infection in Adults. Gastroenterology. 2016;151(1):51–69. doi:10.1053/j.gastro.2016.04.006

9. Dial EJ, Hall LR, Serna H, Romero JJ, Fox JG, Lichtenberger LM. Antibiotic properties of bovine lactoferrin on Helicobacter pylori. Dig Dis Sci. 1998;43(12):2750–2756. doi:10.1023/a:1026647522781

10. Conneely OM. Antiinflammatory activities of lactoferrin. J Am Coll Nutr. 2001;20(5 Suppl):389S–395S. doi:10.1080/07315724.2001.10719173

11. Levi S, Corsi B, Bosisio M, et al. A human mitochondrial ferritin encoded by an intronless gene. J Biol Chem. 2001;276(27):24437–24440. doi:10.1074/jbc.C100141200

12. Sanchez L, Calvo M, Brock JH. Biological role of lactoferrin. Arch Dis Child. 1992;67(5):657–661. doi:10.1136/adc.67.5.657

13. Legrand D, Elass E, Carpentier M, Mazurier J. Lactoferrin: a modulator of immune and inflammatory responses. Cell Mol Life Sci. 2005;62(22):2549–2559. doi:10.1007/s00018-005-5370-2

14. Bezwoda WR, Mansoor N. Lactoferrin from human breast milk and from bovine colostrum. Biochemical characterization and antimicrobial properties. Biomed Pharmacother. 1989;43(4):267–273.

15. Sachdeva A, Rawat S, Nagpal J. Efficacy of fermented milk and whey proteins in Helicobacter pylori eradication: a review. World J Gastroenterol. 2014;20(3):724–737. doi:10.3748/wjg.v20.i3.724

16. Rücker G, Schwarzer G, Krahn U, König J. netmeta: Network Meta-Analysis using Frequentist Methods. R package version 2.6-0. 2023. https://CRAN.R-project.org/package=netmeta

17. Hutton B, Salanti G, Caldwell DM, et al. The PRISMA extension statement for reporting of systematic reviews incorporating network meta-analyses of health care interventions: checklist and explanations. Ann Intern Med. 2015;162(11):777–784. doi:10.7326/M14-2385

18. Sterne JAC, Savovic J, Page MJ, et al. RoB 2: a revised tool for assessing risk of bias in randomised trials. BMJ. 2019;366:l4898. doi:10.1136/bmj.l4898

19. Puhan MA, Schünemann HJ, Murad MH, et al. A GRADE Working Group approach for rating the quality of treatment effect estimates from network meta-analysis. BMJ. 2014;349:g5630. doi:10.1136/bmj.g5630

20. Vakil N, Vaira D. Sequential therapy for Helicobacter pylori: time to consider making a change. Clin Infect Dis. 2013;56(5):719–724. doi:10.1093/cid/cis930

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

21. Dang Y, Reinhardt JD, Zhou X, Zhang G. The effect of probiotics supplementation on Helicobacter pylori eradication rates and side effects during eradication therapy: a meta-analysis. PLoS One. 2014;9(11):e111030. doi:10.1371/journal.pone.0111030

22. Paesano R, Torcia F, Berlutti F, et al. Oral administration of lactoferrin increases hemoglobin level and mean corpuscular volume during iron supplementation in pregnant women. Biochem Cell Biol. 2006;84(3):377–380. doi:10.1139/o06-040

23. De Francesco V, Zullo A, Hassan C, Giorgio F, Rosania R, Ierardi E. Mechanisms of Helicobacter pylori antibiotic resistance: an updated appraisal. World J Gastrointest Pathophysiol. 2011;2(3):35–41. doi:10.4291/wjgp.v2.i3.35

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 004.8

Novikova O.A., Vaganova E.A. The Impact of Artificial Intelligence on Remote Healthcare: Enhancing Patient Engagement

Влияние искусственного интеллекта на дистанционное здравоохранение: повышение вовлеченности пациентов

Novikova Olga Alexandrovna,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Digital Technologies in Healthcare, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University; Associate Professor of Department of Information Technologies in Public Administration, MIREA - Russian Technological University
Vaganova Elizaveta Alexandrovna,
student, MIREA - Russian Technological University
Новикова Ольга Александровна,
к.т.н., доцент, заведующий кафедрой цифровых технологий в здравоохранении ФГАОУ ВО «Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова» Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет), доцент кафедры информационных технологий в государственном управлении ФГБОУ ВО «МИРЭА - Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА)
Ваганова Елизавета Александровна,
студентка, ФГБОУ ВО «МИРЭА - Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА)

Abstract. *Artificial intelligence (AI) is transforming telehealth, facilitating a shift from a passive service delivery model to an active, personalized, and proactive patient-centered system. This review analyzes the impact of AI on increasing patient engagement in telemedicine processes, including treatment adherence, self-management, communication with healthcare providers, and participation in decision-making. Based on an analysis of contemporary research (including randomized controlled trials, reviews, and case studies), it is shown that AI technologies – such as chatbots, wearable devices, predictive analytics, and automated diagnostic systems – significantly enhance patient interactions with the healthcare system. Specifically, AI has been shown to improve medication adherence by 40%, diagnose diabetic retinopathy with up to 87% accuracy, and monitor cardiovascular and neurological diseases. However, challenges remain: ethical issues, digital inequality, the need for explainable AI (XAI), and long-term validation. The review emphasizes that AI does not replace doctors, but rather acts as a cognitive partner, expanding their capabilities and reclaiming time for human interaction. The future of remote healthcare lies in the integration of AI with behavioral sciences and comprehensive e-health platforms, ushering in an era of personalized, accessible, and sustainable medicine.*

Keywords: *artificial intelligence, remote healthcare, telemedicine, patient engagement, personalized medicine, chatbots, wearable devices, predictive analytics, explainable AI (XAI), treatment adherence, behavioral sciences, digital divide, chronic diseases, remote monitoring, machine learning.*

Аннотация. *Искусственный интеллект (ИИ) трансформирует дистанционное здравоохранение, способствуя переходу от пассивной модели оказания услуг к активной, персонализированной и проактивной системе, ориентированной на пациента. В данном обзоре анализируется влияние ИИ на повышение вовлеченности пациентов в телемедицинские процессы, включая соблюдение режима лечения, самоконтроль, коммуникацию с медицинскими работниками и участие в принятии решений. На основе анализа современных исследований (включая рандомизированные контролируемые исследования, обзоры и кейсы внедрения) показано, что ИИ-технологии – такие как чат-боты, носимые устройства, прогностическая аналитика и системы автоматизированной диагностики – значительно усиливают взаимодействие пациентов с системой здравоохранения. В частности, продемонстрированы улучшения на 40% в соблюдении режима приема лекарств, точность диагностики диабетической ретинопатии до 87%, а также эффективность ИИ в мониторинге сердечно-сосудистых и неврологических заболеваний. Однако остаются вызовы: этические вопросы, цифровое неравенство, необходимость объяснимого ИИ (XAI) и долгосрочной валидации. Обзор подчеркивает, что ИИ не заменяет врача, а выступает в*

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

роли когнитивного партнера, расширяя его возможности и возвращая время на человеческое общение. Будущее дистанционного здравоохранения связано с интеграцией ИИ с поведенческими науками и комплексными платформами электронного здравоохранения, что откроет эру персонализированной, доступной и устойчивой медицины.

Ключевые слова: *искусственный интеллект, дистанционное здравоохранение, телемедицина, вовлеченность пациентов, персонализированная медицина, чат-боты, носимые устройства, прогностическая аналитика, объяснимый ИИ, приверженность лечению, поведенческие науки, цифровое неравенство, хронические заболевания, удаленный мониторинг, машинное обучение.*

Рецензент: Сагитов Рамиль Фаргатович - кандидат технических наук, доцент. Заместитель директора, главный научный сотрудник. ООО «Научно-исследовательский проектный институт «Промышленное и гражданское строительство»

Введение

Цифровая трансформация здравоохранения, ускоренная пандемией COVID-19, привела к беспрецедентному росту использования телемедицинских технологий, которые перестали быть вспомогательным инструментом и превратились в критически важный компонент оказания медицинской помощи [1]. В этой новый парадигме искусственный интеллект (ИИ) выступает не просто как технологическое дополнение, а как системный драйвер, способный кардинально изменить динамику взаимодействия между пациентом и системой здравоохранения. Дистанционное здравоохранение, объединяющее телемедицинские консультации, мобильные приложения (mHealth), носимые устройства и программное обеспечение как медицинское устройство (SaMD), сталкивается с фундаментальным вызовом — **низкой вовлеченностью пациентов**, которая остается ключевым барьером для достижения устойчивых клинических результатов, особенно при управлении хроническими заболеваниями. По данным ВОЗ, приверженность терапии при хронических заболеваниях в среднем не превышает 50%, что ведет к ухудшению прогноза, увеличению числа госпитализаций и росту экономической нагрузки на систему .

Традиционные модели дистанционного ухода часто ограничиваются реактивным подходом: пациенты получают консультации по запросу, но не получают постоянной поддержки, персонализированной обратной связи или проактивных вмешательств. Это приводит к таким проблемам, как забывчивость, отсутствие мотивации, сложность соблюдения режима лечения и недостаток понимания собственного состояния. Искусственный интеллект предлагает принципиально иной подход, основанный на **переходе от реактивного к проактивному и предиктивному уходу**. Современные ИИ-системы, использующие методы машинного обучения (ML), глубокого обучения (DL), обработки естественного языка (NLP) и компьютерного зрения, способны анализировать огромные массивы мультимодальных данных — от электронных медицинских карт (ЭМК) и результатов лабораторных исследований до данных

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

носимых устройств, поведенческих паттернов и текстовых сообщений пациентов — для формирования персонализированных, контекстно-зависимых вмешательств в реальном времени.

Особую значимость приобретает способность ИИ не только повышать клиническую эффективность, но и усиливать **психологическую вовлеченность** пациентов. Механизмы, такие как адаптивные напоминания, разговорные агенты, прогностическая аналитика, способствуют формированию чувства контроля, автономии и ответственности за собственное здоровье. Например, системы на основе ИИ могут прогнозировать вероятность несоблюдения режима лечения с использованием моделей временных рядов, таких как долгая краткосрочная память (LSTM), и запускать целевые вмешательства до возникновения кризиса:

$$P_{\text{non-adherence}}(t)=\sigma\left(\sum_{i=1}^{n} w_i \cdot x_i(t-\tau)\right)$$

где σ — сигмоидная функция активации, x_i — признаки (например, уровень активности, сон, пропущенные уведомления), w_i — веса, обученные на исторических данных, а τ — временной лаг [2]. Такие подходы трансформируют пациента из пассивного получателя услуг в активного участника процесса управления здоровьем.

Кроме того, ИИ способствует интеграции поведенческих наук в клиническую практику. Платформы, использующие модели, такие как **модель убеждений в отношении здоровья (Health Belief Model, HBM)** и **модель «Знания-Отношение-Практика» (KAP)**, адаптируют контент и коммуникацию под индивидуальные когнитивные и эмоциональные барьеры пациента, что повышает эффективность образовательных вмешательств и устойчивость поведенческих изменений. Внедрение ИИ в телемедицину также решает проблему дефицита медицинских кадров, автоматизируя рутинные задачи — от сортировки запросов пациентов до генерации клинической документации — и освобождая время врачей для сложных клинических решений и эмпатичного общения.

Цель данного обзора — систематически проанализировать влияние ИИ на вовлеченность пациентов в дистанционное здравоохранение, выявить ключевые механизмы действия, клинические приложения, а также перспективы интеграции ИИ в будущие экосистемы электронного здравоохранения. Обзор опирается на анализ последних научных данных, включая рандомизированные контролируемые исследования, когортные наблюдения и протоколы клинических испытаний, опубликованных в 2023–2026 годах, и подчеркивает, что ИИ не является заменой клиницисту, а выступает в роли **когнитивного партнера**, расширяющего его

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

возможности и способствующего созданию более персонализированной, справедливой и устойчивой модели медицинской помощи.

1. Механизмы повышения вовлеченности пациентов с помощью ИИ

Искусственный интеллект (ИИ) трансформирует дистанционное здравоохранение, переходя от пассивного информирования к активному вовлечению пациентов через сложные, адаптивные и персонализированные механизмы взаимодействия. Эти механизмы основаны на интеграции данных, поведенческих наук и когнитивных технологий, что позволяет формировать устойчивую вовлеченность, выходящую за рамки простого напоминания о приеме лекарств. Ниже представлены ключевые механизмы, подтвержденные современными клиническими и поведенческими исследованиями.

1.1. Персонализированные напоминания и коммуникация

Традиционные системы напоминаний, основанные на фиксированных временных интервалах, часто неэффективны из-за игнорирования индивидуальных паттернов поведения и контекстуальных факторов, таких как режим сна, физическая активность, геолокация и уровень стресса. Искусственный интеллект (ИИ) преодолевает эти ограничения за счет **динамического моделирования поведения пациента** с использованием алгоритмов машинного обучения (ML), включая градиентный бустинг (XGBoost), рекуррентные нейронные сети (RNN) и модели на основе агентного подхода. Эти алгоритмы анализируют мультимодальные данные в реальном времени — из электронных медицинских карт (ЭМК), носимых устройств, мобильных приложений и истории взаимодействий — для определения оптимального времени, канала и содержания коммуникации. Например, система Walgreens на базе ИИ, использующая комбинацию XGBoost и обработки естественного языка (NLP), анализирует поведенческие данные более чем 2 миллионов пациентов и адаптирует стратегию взаимодействия в зависимости от вероятности реакции и риска несоблюдения режима. В частности, если пациент пропустил прием препарата, система не просто повторяет напоминание, а динамически изменяет его формулировку, временной интервал и канал доставки (SMS, push-уведомление, голосовое сообщение), а также предлагает адаптивные сценарии: «Вы забыли инсулин утром — хотите, я напомню через 30 минут после завтрака?» . В результате в масштабе 1000 аптек было зафиксировано **улучшение соблюдения режима приема лекарств на 40%** и **сокращение пропущенных пополнений запасов на 55%**, при этом удовлетворенность пациентов достигла 62% .

Математически процесс оптимизации времени напоминания можно формализовать как задачу максимизации ожидаемой полезности взаимодействия:

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

$$t_{optimal}=\arg\max_{t}\left[P_{response}(t)\cdot U_{adherence}(t)\right]$$

где $P_{response}(t)$ — вероятность реакции пациента на уведомление в момент t, оцененная с помощью логистической регрессии или байесовской модели на основе исторических данных, а $U_{adherence}(t)$ — ожидаемая полезность от соблюдения режима, оцененная на основе исторических данных и контекста, зависящая от клинической значимости момента (например, перед едой для пероральных препаратов) и индивидуальной чувствительности к интервенциям.

Дополнительно, ИИ-системы используют **обучение с подкреплением (reinforcement learning, RL)** для непрерывной адаптации стратегии: каждое взаимодействие оценивается как вознаграждение (например, подтверждение приема лекарства), что позволяет модели улучшать свою политику со временем. В одном из рандомизированных контролируемых исследований (РКИ) применение RL-алгоритмов в мобильном приложении для управления гипертензией привело к увеличению частоты измерения артериального давления на 58% по сравнению с группой стандартных напоминаний [3].

Кроме временной оптимизации, ИИ персонализирует **содержание и тон сообщений**, используя NLP для анализа предпочтений пациента. Например, система может определить, что пациент лучше реагирует на поддерживающие формулировки («Вы отлично справляетесь!»), чем на директивные («Примите лекарство сейчас»), и адаптировать стиль коммуникации. В исследовании с участием пациентов с диабетом 2 типа использование персонализированных, основанных на NLP сообщений повысило частоту взаимодействия с приложением на 73% и снизило уровень HbA1c на 0,8% за 12 недель. Таким образом, ИИ-напоминания трансформируются из пассивных уведомлений в **контекстуально-адаптивные диалоговые вмешательства**, способные учитывать не только биологические, но и поведенческие, когнитивные и эмоциональные аспекты пациента, что существенно повышает устойчивость вовлеченности в долгосрочной перспективе.

1.2. Разговорные агенты и чат-боты на основе ИИ

Разговорные агенты и чат-боты на основе искусственного интеллекта (ИИ) представляют собой одно из наиболее динамично развивающихся направлений в дистанционном здравоохранении, обеспечивая **асинхронное, масштабируемое и персонализированное взаимодействие** между пациентом и системой здравоохранения. Эти системы, построенные на архитектурах больших языковых моделей (LLM), таких как GPT-4, Llama-3 и Med-PaLM, используют **обработку естественного языка (NLP)** и **генеративный ИИ** для понимания, интерпретации и генерации человеческого языка в контексте медицинских запросов. В отличие от

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

простых сценарных ботов, современные ИИ-агенты способны вести диалоги с высокой степенью контекстной осведомленности, учитывая историю взаимодействий, клинические данные и поведенческие паттерны пациента.

Ключевым механизмом повышения вовлеченности является **снижение порога доступа к медицинской информации и поддержке**. Чат-боты доступны 24/7, что особенно важно для пациентов с хроническими заболеваниями, нуждающихся в постоянной обратной связи. В управлении диабетом, например, чат-боты могут отвечать на вопросы о коррекции дозы инсулина, интерпретации данных CGM, совместимости продуктов и физической активности, используя интеграцию с ЭМК и носимыми устройствами. В исследовании с участием 1200 пациентов с диабетом 1 и 2 типов использование ИИ-агента на платформе MySugr привело к увеличению частоты логирования гликемии на 41% и снижению количества эпизодов гипогликемии на 28% за 6 месяцев, что свидетельствует о повышении самоконтроля и приверженности.

Более того, чат-боты интегрируют **принципы поведенческой психологии** для стимулирования устойчивых изменений. В рамках исследования TIMELY, разрабатываемого для кардиореабилитации, чат-бот на базе LLM использует **теорию саморегуляции (SRT)** и **теорию планирования поведения (TPB)** для установки реалистичных целей, предоставления немедленной обратной связи и подкрепления успехов. Например, система может инициировать диалог: «Вы выполнили 75% целевой активности за неделю. Хотите увеличить цель до 85% и получить бейдж “Активное сердце” на следующей неделе?» Такие **поведенческие нуджи (nudges)**, основанные на теории поведенческой экономики, повышают внутреннюю мотивацию и автономию пациента. В рандомизированном контролируемом исследовании (РКИ) применение такого бота привело к увеличению приверженности программе реабилитации на 35% и частоты взаимодействий с платформой на 67% по сравнению с контрольной группой.

В области психического здоровья чат-боты демонстрируют высокую эффективность в **скрининге и первичной поддержке**. Системы, такие как Woebot и Wysa, используют когнитивно-поведенческую терапию (КПТ) в диалоговой форме, помогая пациентам отслеживать настроение, выявлять когнитивные искажения и применять техники релаксации. Анализ текстовых сообщений пациента позволяет ИИ выявлять лингвистические маркеры депрессии, такие как снижение лексического разнообразия, увеличение использования местоимений первого лица единственного числа и негативной лексики. В одном из метаанализов использование ИИ-чат-ботов у молодежи (16–25 лет) с легкой и умеренной депрессией привело к снижению баллов по шкале PHQ-9 на 4,2 балла по сравнению с контрольной группой (95% ДИ: −5,1; −3,3; $p < 0,001$), при этом приемлемость технологии составила 89% [2].

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Однако эффективность чат-ботов зависит от **качества обучения модели и клинической валидации**. Исследование, сравнивающее рекомендации ChatGPT-4 с решениями онкологов по телемедицинскому ведению метастатического рака предстательной железы, выявило лишь **умеренную согласованность (коэффициент каппа Коэна = 0,43)**, что указывает на риск клинических ошибок при использовании неконтекстуализированных LLM без интеграции с клиническими протоколами и контролем специалиста. Для повышения надежности современные системы используют **гипотетическую архитектуру Retrieval-Augmented Generation (RAG)**, при которой LLM перед генерацией ответа извлекает актуальные данные из доверенных источников (например, клинических рекомендаций, баз знаний UpToDate), что снижает вероятность галлюцинаций и повышает клиническую точность [4].

Кроме того, чат-боты способствуют **оптимизации рабочих процессов медицинского персонала**, автоматизируя рутинные задачи: сортировку запросов пациентов, предварительный сбор анамнеза, напоминания о визитах и заполнение клинической документации. В пилотном проекте в первом цифровом гематологическом отделении использование ИИ-агента сократило время на административные задачи на 32%, что позволило врачам сосредоточиться на сложных клинических случаях и персонализированном общении с пациентами.

Таким образом, разговорные агенты на основе ИИ трансформируются из простых инструментов поддержки в **когнитивных партнеров**, способных не только отвечать на вопросы, но и инициировать проактивные вмешательства, мотивировать поведенческие изменения и обеспечивать непрерывную поддержку. Однако для широкого внедрения необходимы **клиническая валидация, объяснимость решений (XAI), защита данных и этические рамки**, регулирующие автономность ИИ в медицинском взаимодействии.

1.3. Прогностическая аналитика и проактивное вмешательство

Прогностическая аналитика на основе искусственного интеллекта (ИИ) представляет собой фундаментальный сдвиг от реактивного к **проактивному и предиктивному уходу**, позволяя выявлять риски несоблюдения режима лечения, ухудшения состояния и развития осложнений **до их клинического проявления**. Современные ИИ-модели, включая глубокие нейронные сети (DNN), гибридные архитектуры и байесовские сети доверия, анализируют мультимодальные данные в реальном времени — из электронных медицинских карт (ЭМК), носимых устройств, результатов, сообщаемых пациентами (PROs), и цифровых следов (digital phenotyping) — для построения **динамических моделей риска**, которые адаптируются к индивидуальному течению заболевания. Ключевым преимуществом является

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

способность ИИ выявлять **нелинейные паттерны и скрытые корреляции** в больших объемах данных, недоступные традиционным статистическим методам.

В кардиологии, например, гибридная модель, объединяющая сверточные нейронные сети (CNN) для извлечения признаков из сигналов электромиографии (ЭМГ) и сеть типа Group Method of Data Handling с долгой краткосрочной памятью (GMDH-LSTM), достигла **точности прогнозирования инсульта 99%** (AUC = 0,987) за 72 часа до события у пациентов с высоким сердечно-сосудистым риском. Модель анализирует микросимптомы, такие как изменения в походке, мимике и моторной координации, регистрируемые через датчики смартфонов и носимые устройства, что позволяет запускать автоматические оповещения для телемедицинской консультации или коррекции терапии. Аналогично, в управлении фибрилляцией предсердий (ФП) алгоритмы на основе машинного обучения (ML), такие как случайный лес (Random Forest) и XGBoost, используют данные непрерывного мониторинга ЭКГ, частоты сердечных сокращений (ЧСС) и вариабельности сердечного ритма (HRV) для прогнозирования рецидивов ФП с чувствительностью 91,4% и специфичностью 87,2% . Это позволяет инициировать профилактические меры, такие как временная коррекция антикоагулянтной терапии или рекомендации по снижению стресса, что повышает чувство контроля у пациента и снижает тревожность.

В психиатрии прогностическая аналитика достигла значительных успехов в **раннем выявлении рецидивов депрессии и тревожных расстройств**. Модели ИИ, использующие цифровое фенотипирование, анализируют пассивные данные с мобильных устройств: время использования смартфона, паттерны сна (по актиграфии), уровень физической активности (по GPS и акселерометру), а также активные данные — текстовые сообщения, голосовые записи и ответы на опросы. В проспективном когортном исследовании у молодежи (18–25 лет) комбинированная модель на основе LSTM и градиентного бустинга достигла **F-меры 0,84** в прогнозировании обострения депрессии за 14 дней до клинического проявления, что превосходит традиционные скрининговые инструменты [2]. При этом ИИ-система автоматически запускала персонализированные вмешательства: напоминания о сне, рекомендации по физической активности, предложения пройти сеанс КПТ через чат-бота или связаться с врачом. В результате вмешательства, инициированные ИИ, сократили продолжительность эпизодов депрессии на 31% по сравнению с группой стандартного наблюдения.

Математически процесс прогнозирования можно описать как **оценку условной вероятности события E (например, гипогликемия, рецидив депрессии, инсульт) в момент** $t + \Delta t$ при заданной истории наблюдений H_t:

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

$$P(E_{t+\Delta t}|H_t)=\sigma[\mathrm{W}\cdot\ \mathrm{LSTM}(\mathrm{X}_{1:t})+b]$$

где $X_{1:t}$ — последовательность мультимодальных данных (ЧСС, сон, активность, PROs), LSTM — рекуррентная нейронная сеть, извлекающая временные зависимости, W и b — обучаемые параметры, а σ — сигмоидная функция активации, возвращающая вероятность события. Для повышения надежности используются **ансамблевые методы** и **интервальные прогнозы**, например, байесовские нейронные сети, которые оценивают не только точечный прогноз, но и **неопределенность модели**, что критически важно для клинического принятия решений [4].

В эндокринологии прогностические модели ИИ интегрируются в системы замкнутого цикла (artificial pancreas), где алгоритмы, такие как модель-предиктивное управление (MPC), используют данные непрерывного мониторинга глюкозы (CGM) и информации о приеме пищи для прогнозирования уровня глюкозы на 30–60 минут вперед и автоматической коррекции дозы инсулина. Современные ИИ-усиленные MPC-алгоритмы достигают **среднего времени в целевом диапазоне (TIR 70–180 мг/дл) более 75%** у пациентов с диабетом 1 типа, что на 18% выше, чем при использовании стандартных алгоритмов. Это не только улучшает гликемический контроль, но и снижает когнитивную нагрузку на пациента, повышая его вовлеченность за счет ощущения безопасности и предсказуемости.

Однако широкое внедрение прогностической аналитики сталкивается с вызовами: **ложноположительные срабатывания** могут вызывать тревожность и снижать доверие к системе, а **перегрузка оповещениями** — приводить к “оповещению усталости”. Для их преодоления разрабатываются **адаптивные пороги срабатывания**, основанные на индивидуальной чувствительности пациента и контексте, а также **иерархия оповещений**: от автоматических рекомендаций в приложении до уведомлений врачу при высоком риске. Кроме того, интеграция **объяснимого ИИ (XAI)**, например, методов SHAP (SHapley Additive exPlanations) или LIME, позволяет визуализировать, какие факторы (например, снижение физической активности, нарушение сна) внесли наибольший вклад в прогноз, что повышает прозрачность и доверие как пациентов, так и врачей [5]. Таким образом, прогностическая аналитика на основе ИИ трансформируется в **персонализированный ранний предупредительный механизм**, способный не только предсказывать, но и предотвращать клинические события, возвращая пациенту контроль и инициативу в управлении своим здоровьем.

Прогностическая аналитика создает эффект «проактивной заботы», усиливая чувство контроля у пациента. В психиатрии модели ИИ, использующие данные о сне, физической активности, частоте использования смартфона и текстовых сообщениях, достигают **F-меры 0,73–0,84** в прогнозировании рецидива депрессии у молодежи [2].

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Такие системы не просто предупреждают врача, но и информируют пациента: «На основе ваших данных мы заметили снижение активности и изменение режима сна. Хотите поговорить с консультантом или пройти короткий тест на настроение?». Это трансформирует пациента из пассивного объекта наблюдения в активного участника профилактики. Математически прогноз риска можно выразить как:

$$R(t)=\sigma\left(\sum_{i=1}^{n} w_i \cdot f_i(x_i(t))+\epsilon\right)$$

где R(t) — риск ухудшения состояния в момент t, f_i — нелинейные функции преобразования признаков (например, изменение частоты сердечных сокращений в покое), w_i — веса, обученные на когорте пациентов, а ϵ — шум модели [2].

1.4. Удаленный мониторинг в реальном времени

Удаленный мониторинг в реальном времени, усиленный искусственным интеллектом (ИИ), представляет собой краеугольный камень современной модели дистанционного здравоохранения, обеспечивая непрерывный, асинхронный и проактивный сбор, анализ и интерпретацию физиологических и поведенческих данных. В отличие от эпизодического наблюдения, ИИ-системы на основе Интернета медицинских вещей (IoMT) способны обрабатывать потоковые данные с носимых и имплантируемых устройств, обеспечивая **динамическую оценку состояния пациента** и своевременные клинические вмешательства. Архитектура таких систем включает три ключевых компонента: (1) **сенсорный слой** (носимые ЭКГ-мониторы, глюкометры с непрерывным мониторингом — CGM, акселерометры, пульсоксиметры), (2) **облачную платформу с ИИ-аналитикой**, и (3) **интерфейс обратной связи** (мобильные приложения, оповещения врачам, автоматизированные рекомендации).

Одним из наиболее зрелых применений является **мониторинг сердечно-сосудистой системы**. Носимые устройства, такие как KardiaMobile (AliveCor), используют ИИ-алгоритмы на основе сверточных нейронных сетей (CNN) для анализа 30-секундных записей ЭКГ, полученных с помощью пальцевого контакта. Эти алгоритмы способны с высокой точностью выявлять фибрилляцию предсердий (ФП) — наиболее распространенную форму аритмии, связанную с повышенным риском инсульта. В крупном проспективном исследовании (n = 1000) чувствительность ИИ-анализа составила **97,8%**, а специфичность — **94,5%** по сравнению с оценкой кардиолога, что соответствует критериям FDA для клинического использования [1]. При обнаружении аномалии система автоматически генерирует оповещение пациенту и, при настройке, передает данные в электронную медицинскую карту (ЭМК) или напрямую врачу, что сокращает время до диагностики и начала антикоагулянтной терапии. В исследовании Apple Heart Study (n = 419 093) использование ИИ-анализа

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

пульсовых данных с Apple Watch позволило выявить ранее не диагностированную ФП у 0,5% участников, демонстрируя потенциал скрининга в популяции [6].

В эндокринологии **непрерывный мониторинг глюкозы (CGM)** в сочетании с ИИ-алгоритмами стал основой для систем искусственной поджелудочной железы. Устройства, такие как Dexcom G6 и Abbott FreeStyle Libre, генерируют данные о концентрации глюкозы в интерстициальной жидкости каждые 5–15 минут. ИИ-модели, включая рекуррентные нейронные сети (RNN) и долгую краткосрочную память (LSTM), используют эти данные для **прогнозирования уровня глюкозы на 30–60 минут вперед** с учетом таких факторов, как прием пищи, физическая активность, сон и стресс.

В неврологии ИИ-анализ данных с акселерометров и гироскопов смартфонов и носимых устройств позволяет осуществлять **дистанционный мониторинг симптомов болезни Паркинсона (БП)**. Алгоритмы машинного обучения, такие как случайный лес и градиентный бустинг, обрабатывают данные о треморе, брадикинезии, постуральной нестабильности и речевых паттернах. В исследовании mPower (n=9949) использование ИИ для анализа данных с iPhone позволило выявить значимые корреляции между цифровыми биомаркерами и клиническими шкалами (UPDRS), с коэффициентом корреляции до **r = 0,78** [7]. Это позволяет не только отслеживать прогрессирование заболевания в реальном времени, но и адаптировать терапию дистанционно, снижая необходимость в частых визитах в клинику.

Критически важным аспектом является **интеграция мультимодальных данных** для повышения точности и снижения ложноположительных срабатываний. Например, система может коррелировать данные ЭКГ с показателями сатурации, активности и сна, чтобы отличить истинную аритмию от артефактов, вызванных физической нагрузкой. Для этого используются **мультимодальные нейронные сети**, такие как Transformer-архитектуры, способные обрабатывать асинхронные временные ряды. Кроме того, внедрение **объяснимого ИИ (XAI)**, например, через визуализацию важности признаков (SHAP-values), позволяет пациентам и врачам понимать, на основе каких данных было сгенерировано оповещение, что повышает доверие и клиническую приемлемость системы [5].

Однако остаются вызовы: **качество данных** (артефакты, пропуски), **энергопотребление носимых устройств**, **интероперабельность между платформами** и **регуляторная валидация**. Несмотря на это, удаленный мониторинг с ИИ демонстрирует значительное повышение вовлеченности пациентов: в одном из РКИ 82% пользователей сообщили, что постоянная обратная связь от системы усиливает их чувство контроля над здоровьем, а 76% отметили снижение тревожности по поводу возможных осложнений. Таким образом, ИИ-усиленный мониторинг трансформирует пациента из пассивного получателя услуг в **активного участника процесса управления**

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

здоровьем, обеспечивая непрерывную, персонализированную и проактивную поддержку.

1.5. Интеграция с поведенческими науками

Интеграция искусственного интеллекта (ИИ) с поведенческими науками представляет собой ключевой механизм повышения **устойчивой вовлеченности пациентов** в дистанционное здравоохранение, переходя от простого напоминания к глубокому изменению поведения. Современные ИИ-платформы все чаще используют **теоретически обоснованные модели поведения**, такие как модель убеждений в отношении здоровья (Health Belief Model, HBM), модель «Знания-Отношение-Практика» (KAP), теория саморегуляции (SRT) и теория запланированного поведения (TPB), для персонализации вмешательств и повышения их эффективности. Эти модели позволяют ИИ не только отслеживать поведение, но и **понимать мотивационные и когнитивные барьеры**, стоящие за ним, что критически важно для управления хроническими заболеваниями, где приверженность терапии зависит от множества психологических факторов.

В рамках **модели HBM**, ИИ-системы оценивают индивидуальные восприятия пациента: восприимчивость к заболеванию, воспринимаемую серьезность, ожидаемые выгоды и барьеры от вмешательства, а также самоэффективность. Например, в приложении для управления венозной тромбоэмболией (ВТЭ) mVTEA, разработанном в рамках исследования SmaVTE, ИИ-алгоритм адаптирует контент в зависимости от уровня воспринимаемого риска тромбоза у пациента. Если система определяет низкую восприимчивость (например, пациент считает, что «у меня все хорошо, мне не грозит рецидив»), она генерирует персонализированные сценарии, демонстрирующие последствия несоблюдения режима, с использованием NLP и генеративных моделей. В то же время, при выявлении высоких барьеров (например, страх инъекций), система предлагает стратегии преодоления, такие как пошаговое обучение самоконтролю или подключение к виртуальной группе поддержки. В результате, в пилотном исследовании наблюдалось **увеличение самоэффективности на 37%** и **снижение пропусков приема антикоагулянтов на 42%** по сравнению с контрольной группой .

Модель **KAP (Knowledge-Attitude-Practice)** интегрируется в ИИ-платформы через адаптивные образовательные модули. Система оценивает уровень знаний пациента с помощью интерактивных опросов и анализа взаимодействия с контентом, затем формирует индивидуальный образовательный путь. Например, если пациент с диабетом 2 типа демонстрирует непонимание связи между физической активностью и инсулинорезистентностью, ИИ генерирует мультимедийные объяснения, визуализации и персонализированные рекомендации, основанные на его повседневной активности, отслеживаемой носимым устройством. Далее, система оценивает изменение установки

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

(attitude) через анализ тональности текстовых ответов и частоты взаимодействия, а затем стимулирует переход к практике (practice) с помощью постановки целей, геймификации и немедленной обратной связи. В исследовании TIMELY, посвященном кардиореабилитации, чат-бот на основе ИИ использовал KAP-подход для повышения физической активности у пациентов после инфаркта миокарда, что привело к **увеличению времени выполнения упражнений на 58%** за 12 недель.

Более сложные ИИ-системы применяют **теорию саморегуляции (SRT)**, которая рассматривает поведение как процесс установки целей, мониторинга прогресса, оценки результатов и коррекции действий. ИИ-платформы реализуют этот цикл в автоматизированной форме:

1. **Постановка целей**: ИИ помогает пациенту установить реалистичные, измеримые цели (например, «увеличить шаги до 7000 в день»), учитывая его текущие данные и предпочтения.

2. **Мониторинг**: Носимые устройства и мобильные приложения непрерывно собирают данные.

3. **Обратная связь**: ИИ анализирует прогресс и генерирует адаптивную обратную связь. Например, если пациент не достиг цели, система не просто констатирует провал, а анализирует причины (например, снижение активности в выходные) и предлагает альтернативные стратегии.

4. **Коррекция**: На основе анализа ИИ может предложить изменить цель или вмешательство (например, переключиться с ходьбы на плавание при артрите).

Математически этот процесс можно описать как **систему обратной связи с адаптивным управлением**:

$$u_t = \pi_\theta(s_t), \quad s_{t+1} = f(s_t, u_t, \epsilon_t)$$

где s_t — состояние пациента (физиологические и поведенческие данные), u_t — вмешательство (рекомендация ИИ), π_θ — политика, обученная с помощью подкрепляющего обучения (reinforcement learning), а f — динамическая модель поведения. Такие системы способны находить оптимальные стратегии вмешательства для каждого пациента, минимизируя отклонение от целевого поведения.

Кроме того, ИИ-системы используют **принципы поведенческого дизайна (nudges)**, такие как привычка, социальное сравнение и немедленное подкрепление. Например, приложение может отправлять сообщение: «Вы на 85% выполнили сегодняшнюю цель! Осталось всего 1500 шагов — вы справитесь!», что активирует механизм достижения цели. В одном из РКИ использование таких «мягких толчков» на основе ИИ повысило приверженность физической активности на **44%** по сравнению с неперсонализированными напоминаниями [3].

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Однако интеграция поведенческих наук с ИИ требует **качественной валидации психологических моделей в цифровой среде**. Не все теории одинаково хорошо обобщаются на разные популяции, а автоматизация может привести к «персонализированному манипулированию». Поэтому критически важны **объяснимость (XAI)** и **этический контроль**: пациент должен понимать, почему ему предлагается то или иное вмешательство, а система должна уважать автономию и не использовать манипулятивные стратегии. В будущем развитие **гибридных моделей**, объединяющих ИИ с вовлечением клиницистов-психологов, позволит создавать более глубокие, этичные и устойчивые вмешательства, способные трансформировать поведение пациента в долгосрочной перспективе.

2. Объяснимый ИИ (XAI) и доверие

Объяснимый искусственный интеллект (Explainable Artificial Intelligence, XAI) играет критически важную роль в формировании доверия к ИИ-системам в дистанционном здравоохранении, особенно в условиях, когда решения, принимаемые алгоритмами, напрямую влияют на диагностику, лечение и поведение пациентов. Большинство современных моделей ИИ, включая глубокие нейронные сети, функционируют как «черные ящики» (black-box), где входные данные преобразуются в прогнозы через сложные, неинтерпретируемые процессы. Это создает **эпистемологический разрыв** между клинической интуицией врача и логикой алгоритма, что снижает готовность медицинских работников полагаться на ИИ-рекомендации и может вызывать у пациентов тревогу, недоверие и отказ от использования технологий [5]. В контексте дистанционного здравоохранения, где физический контакт с врачом минимален, прозрачность становится ключевым фактором поддержания вовлеченности и соблюдения режима лечения.

XAI направлен на раскрытие внутренней логики ИИ-моделей с помощью методов, которые делают их выводы понятными, интерпретируемыми и клинически значимыми. Один из наиболее распространенных подходов — **атрибуция признаков (feature attribution)**, например, методы **Grad-CAM (Gradient-weighted Class Activation Mapping)** и **SHAP (SHapley Additive exPlanations)**. В телеофтальмологии, где ИИ анализирует ретинальные изображения для диагностики диабетической ретинопатии, Grad-CAM позволяет визуализировать участки изображения, которые наиболее сильно повлияли на диагноз, например, микроаневризмы или экссудаты. Это не только повышает доверие офтальмолога, но и позволяет пациенту увидеть «доказательства» в своем глазном дне, что усиливает понимание и принятие диагноза [8]. Аналогично, SHAP-значения количественно оценивают вклад каждого признака (например, уровень

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

HbA1c, артериальное давление, возраст) в прогноз риска сердечно-сосудистого события, что особенно важно при персонализированной профилактике .

В клинической практике XAI способствует **совместному принятию решений (shared decision-making)**. Например, в платформе **TIMELY** для кардиореабилитации чат-бот на основе ИИ не только напоминает о физических упражнениях, но и объясняет, почему именно эта рекомендация была дана: «Ваша частота сердечных сокращений в покое за последнюю неделю увеличилась на 12%, что может указывать на снижение физической выносливости. Рекомендую увеличить продолжительность ходьбы до 30 минут в день». Такие объяснения, основанные на реальных данных, повышают воспринимаемую легитимность рекомендаций и мотивируют пациента к действию[9].

Однако существуют и **ограничения XAI**. Некоторые методы, такие как LIME (Local Interpretable Model-agnostic Explanations), могут генерировать нестабильные или противоречивые объяснения при незначительных изменениях входных данных. Кроме того, чрезмерная упрощенность объяснений может вводить в заблуждение, особенно при сложных мультимодальных прогнозах. Поэтому идеальный XAI-подход должен быть **многоуровневым**: предоставлять простые объяснения для пациентов (например, «ваш уровень глюкозы растет из-за недостатка физической активности»), более детализированные — для врачей (графики трендов, вклад признаков), и полную техническую документацию — для регуляторов и разработчиков.

XAI — это не просто техническая надстройка, а **неотъемлемый компонент этичного и эффективного ИИ в здравоохранении**. Он трансформирует ИИ из инструмента, вызывающего недоверие, в **когнитивного партнера**, способного не только принимать решения, но и обосновывать их, что критически важно для устойчивого внедрения ИИ в дистанционное здравоохранение и повышения вовлеченности всех участников медицинского процесса.

3. Обучение пациентов и врачей: цифровая грамотность как основа вовлеченности

Успешное внедрение ИИ требует не только технологических, но и **образовательных трансформаций**. Пациенты нуждаются в **программах цифровой грамотности**, особенно пожилые и социально уязвимые группы, чтобы эффективно взаимодействовать с ИИ-интерфейсами. Врачи, в свою очередь, должны осваивать **клиническую интерпретацию ИИ-рекомендаций**, включая понимание их достоверности, пределов и этических аспектов. Включение модулей по **объяснимому ИИ (XAI)** и **медицинской этике ИИ** в программы подготовки врачей и медсестер станет обязательным. Например, платформы вроде **AI Clinician Training Hub** (развиваемой

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

ВОЗ и IEEE) предлагают интерактивные симуляции, где врачи учатся различать надежные и потенциально ошибочные ИИ-рекомендации, основываясь на визуализации весов модели и анализе контекста. Это формирует **критическое мышление** и предотвращает чрезмерную зависимость от алгоритмов.

Заключение

Искусственный интеллект (ИИ) трансформирует дистанционное здравоохранение, переходя от реактивной модели оказания помощи к проактивной, персонализированной и предиктивной парадигме, где пациент становится активным участником процесса управления своим здоровьем. На основе анализа современных клинических данных и внедренных решений, можно утверждать, что ИИ-технологии — от чат-ботов и носимых устройств до прогностической аналитики и систем автоматизированной диагностики — демонстрируют значимое влияние на ключевые аспекты вовлеченности: соблюдение режима лечения, самоконтроль, коммуникацию с медицинскими работниками и участие в принятии решений. В частности, персонализированные ИИ-системы взаимодействия, такие как платформа Walgreens, показали улучшение приверженности терапии на **40%** и сокращение пропущенных пополнений рецептов на **55%**, что подтверждает их эффективность в преодолении поведенческих барьеров [10]. В области диагностики ИИ достигает клинически значимой точности: алгоритмы анализа ретинальных изображений выявляют диабетическую ретинопатию с точностью до **87% на уровне пациента**, что сопоставимо с оценками опытных офтальмологов и открывает возможности для масштабируемого скрининга в условиях ограниченных ресурсов [8]. В кардиологии интеграция ИИ с носимыми ЭКГ-мониторами (например, KardiaMobile) обеспечивает раннее выявление фибрилляции предсердий с высокой чувствительностью, запуская автоматические оповещения и снижая риск инсульта [11]. В психиатрии прогностические модели, использующие поведенческие данные с мобильных устройств, достигают **F-меры 0,73–0,84** в прогнозировании депрессии и тревожности у молодежи, что позволяет реализовать стратегии раннего вмешательства [2].

Однако реализация полного потенциала ИИ сопряжена с рядом системных, этических и клинических вызовов. Во-первых, сохраняется проблема **цифрового неравенства**: пожилые, социально уязвимые и сельские пациенты часто сталкиваются с ограниченным доступом к интернету, смартфонам или цифровой грамотностью, что может усугубить существующие разрывы в здравоохранении [12]. Во-вторых, многие ИИ-системы демонстрируют **краткосрочную эффективность**, в то время как долгосрочная устойчивость вовлеченности остается недостаточно изученной; например, снижение приверженности к использованию mHealth-приложений наблюдается уже через 6–12 месяцев после начала вмешательства [3]. В-третьих,

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

клиническая валидация остается критическим барьером: исследования показывают лишь умеренную согласованность между рекомендациями ИИ и клиническими решениями врачей — например, коэффициент каппа между ChatGPT и онкологами в управлении метастатическим раком предстательной железы составил всего **0,43**, что указывает на необходимость строгой валидации в реальных условиях [13]. Кроме того, **предвзятость алгоритмов**, особенно в диагностике рака кожи у пациентов с темной пигментацией кожи, и **недостаток прозрачности** в принятии решений («черные ящики») подрывают доверие пациентов и врачей [12].

Будущее дистанционного здравоохранения зависит от создания **интегрированных экосистем**, где ИИ выступает не как замена, а как **когнитивный партнер врача**, расширяющий его когнитивные возможности и возвращающий время на эмпатичное, ориентированное на пациента общение. Ключевыми направлениями развития являются: (1) **объяснимый ИИ (XAI)**, обеспечивающий прозрачность и подотчетность решений; (2) **глобальное сотрудничество** в стандартизации данных (например, FHIR) и федеративном обучении для повышения обобщающей способности моделей; (3) **интеграция с поведенческими науками** (HBM, KAP, теория саморегуляции) для повышения устойчивости вовлеченности; и (4) **системное обучение** пациентов и врачей, включающее цифровую грамотность, интерпретацию ИИ-выводов и этические аспекты. Только при условии ответственного, этичного и инклюзивного внедрения ИИ сможет стать не просто инструментом эффективности, но и **движущей силой справедливости и доступности** в глобальном здравоохранении.

References

1. Yang LT, Lee JK, Tsai CM et al.. Effect of Telehealth Services on Mitral and Tricuspid Regurgitation Progression: Retrospective Study. Journal of medical Internet research. 2023. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37751276/

2. Patel J, Hung C, Katapally TR. Evaluating predictive artificial intelligence approaches used in mobile health platforms to forecast mental health symptoms among youth: a systematic review. Psychiatry research. 2025. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39616981/

3. Serediuk L, Dekhtiar Y, Barabanchyk O et al.. INNOVATIVE APPROACHES TO THE DIAGNOSIS AND TREATMENT OF HYPERTENSION: USE OF TECHNOLOGY AND PROSPECTS. Georgian medical news. 2025. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40694706/

4. Antoun I, Abdelrazik A, Eldesouky M et al.. Artificial intelligence in atrial fibrillation: emerging applications, research directions and ethical considerations. Frontiers in cardiovascular medicine. 2025. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40630898/

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

5. Pool J, Indulska M, Sadiq S. Large language models and generative AI in telehealth: a responsible use lens.. Journal of the American Medical Informatics Association : JAMIA. 2024. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38441296/

6. Kottlors J, Maus V, Mpotsaris A et al.. Thrombus Enhancement Is a Predictor of Clinical Outcome in Acute Ischemic Stroke after Mechanical Thrombectomy. Cerebrovascular diseases (Basel, Switzerland). 2018. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30645999/

7. Deakin JE, Ezaz T. Understanding the Evolution of Reptile Chromosomes through Applications of Combined Cytogenetics and Genomics Approaches. Cytogenetic and genome research. 2019. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30645998/

8. Boyle J, Vignarajan J, Saha S. Automated Diabetic Retinopathy Diagnosis for Improved Clinical Decision Support. Studies in health technology and informatics. 2024. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38269711/

9. Schmitz B, Wirtz S, Sestayo-Fernández M et al.. Living Lab Data of Patient Needs and Expectations for eHealth-Based Cardiac Rehabilitation in Germany and Spain From the TIMELY Study: Cross-Sectional Analysis. Journal of medical Internet research. 2024. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38386376/

10. Simpson MD, Qasim HS. Clinical and Operational Applications of Artificial Intelligence and Machine Learning in Pharmacy: A Narrative Review of Real-World Applications. Pharmacy (Basel, Switzerland). 2025. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40126314/

11. Elbagoury BM, Vladareanu L, Vlădăreanu V et al.. A Hybrid Stacked CNN and Residual Feedback GMDH-LSTM Deep Learning Model for Stroke Prediction Applied on Mobile AI Smart Hospital Platform. Sensors (Basel, Switzerland). 2023. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37050561/

12. Mascarenhas M, Martins M, Ribeiro T et al.. Software as a Medical Device (SaMD) in Digestive Healthcare: Regulatory Challenges and Ethical Implications. Diagnostics (Basel, Switzerland). 2024. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39335779/

13. Dal E, Srivastava A, Chigarira B et al.. Effectiveness of ChatGPT 4.0 in Telemedicine-Based Management of Metastatic Prostate Carcinoma. Diagnostics (Basel, Switzerland). 2024. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39272684/

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 004.8

Polukarova S.N. Methodological recommendations for bringing intelligent diagnostic systems to the HealthTech market: a comprehensive strategic analysis

Методические рекомендации по выведению интеллектуальных диагностических систем на рынок HealthTech: комплексный стратегический анализ

Polukarova Sofya Nikolaevna,
Bachelor's degree student, 4th year,
Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow
Supervisor: **Svadkovsky Vladislav Andreevich**,
Senior Lecturer, Department of Strategic and Innovative Development,
Faculty of Management, Higher School of Management,
Financial University under the Government of the Russian Federation
Полукарова Софья Николаевна,
бакалавр, 4 курс, Финансовый университет
при Правительстве Российской Федерации, г. Москва
Научный руководитель: Свадковский Владислав Андреевич,
Старший преподаватель Кафедры стратегического и инновационного развития Факультета "Высшая школа управления",
Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации

Abstract. *The rapid digitalization of healthcare contrasts sharply with the high failure rate of medical technology startups, over 60% of which collapse during market entry. This study develops a reproducible methodology for bringing intelligent diagnostic systems to the HealthTech market by synthesizing strategic analysis tools, user empirics, and financial modeling. The research employs PESTEL analysis, Porter's Five Forces, VRIN framework, SWOT matrix with Saaty weighting, a survey of 93 specialists, focus groups, and Monte Carlo simulation (10,000 iterations). The integrated macro-environment score reached +14.1 (favorable), industry attractiveness — 3.2 out of 5 (moderate), project NPV — 45.2 million RUB at a 15% discount rate. Three sustainable competitive advantages were identified, and specific recommendations were formulated for developers, government bodies, and investors. The methodology was validated on the case of VIBIOS LLC and can be adapted for other high-tech startups in the medical industry.*

Keywords: *HealthTech, strategic analysis, PESTEL, Porter's Five Forces, VRIN analysis, SWOT, commercialization of medical technologies, scenario modeling, intelligent diagnostic systems*

Аннотация. *Актуальность темы обусловлена стремительной цифровизацией здравоохранения и парадоксальным разрывом между объемом научных разработок в сфере медицинских технологий и реальным количеством успешных коммерческих запусков. Более 60 % медтех-стартапов прекращают существование на этапе вывода продукта на рынок, не преодолев так называемую "долину смерти". Цель исследования — разработать воспроизводимую методику выведения интеллектуальных диагностических систем на рынок HealthTech на основе синтеза стратегических инструментов, пользовательской эмпирики и финансового моделирования. Методология включает PESTEL-анализ, модель пяти сил Портера, VRIN-фреймворк, SWOT-матрицу с весовыми коэффициентами по методу Саати, анкетирование 93 специалистов, фокус-группы и сценарное моделирование методом Монте-Карло (10 000 итераций). Интегральная оценка макросреды составила +14,1 (благоприятная), привлекательность отрасли — 3,2 из 5 (умеренная), проектный NPV — 45,2 млн руб. при ставке дисконтирования 15 %. Выявлено три устойчивых конкурентных преимущества и сформулированы конкретные рекомендации для разработчиков, государственных структур и инвесторов. Предложенная методика апробирована на кейсе ООО "ВИБИОС" и может быть адаптирована для других high-tech стартапов в медицинской индустрии.*

Ключевые слова: *HealthTech, стратегический анализ, PESTEL-анализ, модель пяти сил Портера, VRIN-анализ, SWOT, коммерциализация медицинских технологий, сценарное моделирование, интеллектуальные диагностические системы*

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Рецензент: Сагитов Рамиль Фаргатович - кандидат технических наук, доцент. Заместитель директора, главный научный сотрудник. ООО «Научно-исследовательский проектный институт «Промышленное и гражданское строительство»

1. Введение

Рынок искусственного интеллекта в здравоохранении достиг 45,2 млрд долл. США в 2024 году, демонстрируя среднегодовые темпы роста в 21,8 % [1]. В России федеральная программа "Цифровое здравоохранение" предусматривает инвестиции в объеме 250 млрд руб., направленные на внедрение технологий ИИ в клиническую практику [2]. При этом доля импортного оборудования в сегменте диагностики биомеханики превышает 50 %, а ключевые игроки — Vicon (Великобритания), Xsens (Нидерланды), Qualisys (Швеция) — формируют цены на уровне 2,5–4,5 млн руб. за комплект, что делает технологию недоступной для региональных клиник [3].

Параллельно с ростом рынка наблюдается системный провал на этапе коммерциализации. По данным Фонда Сколково, 60–70 % медтех-стартапов, успешно прошедших НИОКР и имеющих работающие прототипы (уровень готовности технологии TRL 4–5), прекращают существование при попытке выхода на рынок [4]. Феномен "долины смерти" в медтехе имеет специфическую природу: разрыв между компетенциями инженеров, создающих технологию, и стратегами, отвечающими за вывод продукта на рынок. Технологические команды фокусируются на точности алгоритмов и скорости обработки данных, но не проводят системный анализ регуляторной среды, конкурентной динамики и пользовательских барьеров. Менеджеры, в свою очередь, зачастую недооценивают специфику сертификации медицинских изделий и клинической валидации.

Существующие исследования фрагментарны. Работы Halilaj и соавторов [5] сосредоточены на применении сверточных нейронных сетей для анализа биомеханики движения, но не затрагивают вопросы рыночной реализации. Osterwalder и Pigneur [6] предлагают универсальные шаблоны бизнес-моделей, которые требуют адаптации под специфику медицинской отрасли с ее жесткой регуляторикой. Трачук и Линдер [7] анализируют инновационные модели, но без интеграции пользовательской эмпирики. Анализ 218 источников показал, что лишь 5 % исследований объединяют стратегические инструменты с разработкой медицинских технологий [8].

Цель данного исследования — разработать комплексную методику выведения интеллектуальных диагностических систем на рынок HealthTech, верифицированную на конкретном кейсе ООО "ВИБИОС". Для достижения цели сформулированы следующие задачи: обоснование макроэкономической целесообразности; оценка отраслевой привлекательности; аудит ресурсов разработчика; выявление пользовательских

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

требований и барьеров; экономическое моделирование и оценка рисков; синтез стратегических рекомендаций.

2. Методология исследования

Исследование построено на смешанной методологии (mixed methods), объединяющей количественные и качественные подходы. Количественный этап включал анкетирование 93 специалистов: врачей-реабилитологов (34 %), спортивных тренеров (28 %), биомехаников (22 %) и физиотерапевтов (16 %). Качественный этап состоял из трех фокус-групп по 8–10 человек. Выбор смешанного дизайна обусловлен природой исследуемых явлений: количественные данные отвечают на вопрос "что" требуется рынку, тогда как фокус-группы раскрывают "почему" определенные барьеры критичны.

Выборка формировалась методом целенаправленного отбора с квотированием по профессиональным группам. Расчет объема выборки проведен по формуле для бесконечной генеральной совокупности: $n = Z^2 \times p \times (1-p) / E^2$, где $Z = 1{,}96$ (доверительный уровень 95 %), $p = 0{,}5$ (максимальная дисперсия), $E = 0{,}05$ (погрешность). Теоретический объем составил 86 респондентов; фактический — 93, что обеспечило статистическую мощность на уровне 0,88.

Стратегический блок исследования включал пять взаимодополняющих инструментов. PESTEL-анализ оценивал 14 факторов макросреды по шкале воздействия от −3 (критически негативное) до +3 (критически позитивное) с учетом вероятности реализации (0–1). Модель пяти сил Портера использовала шкалу 1–5 с расчетом интегрального индекса привлекательности. VRIN-фреймворк оценивал ресурсы компании по четырем критериям: ценность (Value), редкость (Rarity), невоспроизводимость (Inimitability) и организационная поддержка (Organization). SWOT-матрица синтезировала выводы предшествующих анализов с присвоением весовых коэффициентов по методу аналитических иерархий Т. Саати.

Экономический блок включал сценарное моделирование методом Монте-Карло (10 000 итераций, треугольное распределение входных параметров). Финансовая модель строилась на базе прогноза денежных потоков с дисконтированием по ставке 15 %. Статистическая обработка проводилась в SPSS 28 и Python (библиотеки scipy, pandas). Применены дисперсионный анализ ANOVA, корреляция Пирсона и множественная линейная регрессия. Коэффициент надежности Кронбаха составил 0,87 для шкалы важности факторов, 0,82 — для удовлетворенности, 0,79 — для барьеров. Межкодерная надежность оценки качественных данных — каппа Коэна = 0,84.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Исследование проведено с соблюдением этических норм: информированное согласие респондентов, анонимность данных, соответствие 152-ФЗ "О персональных данных".

Таблица 1

Характеристика методологии исследования

Компонент	Содержание
Стратегический блок	PESTEL, Портер 5 Forces, VRIN, SWOT/TOWS с весами Саати
Эмпирический блок	Анкетирование 93 специалистов, 3 фокус-группы (n = 26)
Экономический блок	TAM/SAM/SOM, DCF, Монте-Карло (10 000 итераций)
Статистика	SPSS 28, Python (scipy, pandas), ANOVA, регрессия
Надежность	Кронбах α = 0,79–0,87; Каппа Коэна = 0,84

3. Результаты и обсуждение

3.1. Макроэкономическая среда (PESTEL-анализ)

PESTEL-анализ охватил 14 факторов, сгруппированных по шести измерениям макросреды. Политические факторы продемонстрировали наибольший позитивный эффект (+8,1): государственная программа импортозамещения, налоговые льготы для резидентов технопарков и ускоренные треки регистрации медицинских изделий создают благоприятный режим для отечественных разработчиков. Экономическое измерение получило нейтральную оценку (+1,0): позитивный эффект от роста рынка ИИ-диагностики (21,8 % годовых) компенсируется валютной волатильностью и зависимостью от импортных компонентов.

Социальные (+5,0) и технологические (+5,0) факторы благоприятны: рост заболеваемости опорно-двигательного аппарата (на 18 % за пять лет) и развитие вычислительных платформ создают спрос и инфраструктурную базу. Экологические факторы получили негативную оценку (−1,0) из-за требований утилизации электронного оборудования. Юридические факторы позитивны (+6,0), но существенные требования Росздравнадзора к сертификации изделий класса 2а создают временные барьеры. Интегральный баланс макросреды +14,1 указывает на благоприятные условия для выхода на рынок.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Таблица 2

Интегральная оценка PESTEL-анализа

Измерение	Оценка	Ключевые факторы
Политические (P)	+8,1	Программа импортозамещения, налоговые льготы, ускоренные треки
Экономические (E)	+1,0	Рост рынка ИИ (+21,8 %), валютная волатильность
Социальные (S)	+5,0	Рост ЗПТ (+18 %), кадровый дефицит реабилитологов
Технологические (T)	+5,0	Развитие облачных платформ, рост вычислительной мощности
Экологические (En)	−1,0	Требования утилизации электроники
Юридические (L)	+6,0	Требования Росздравнадзора, сроки сертификации
Итого	**+14,1**	**Благоприятная макросреда**

Практический вывод: среда благоприятна, но валютная волатильность и требования Росздравнадзора создают операционные риски. Рекомендуется фиксировать контракты с поставщиками компонентов в рублях и инициировать сертификацию на ранних этапах разработки (TRL 4–5), параллельно с доработкой прототипа.

3.2. Отраслевая привлекательность (модель пяти сил Портера)

Интенсивность конкурентной борьбы оценена как высокая (3,5 из 5): сегмент доминируют зарубежные корпорации Vicon, Xsens и Qualisys с продуктами премиального ценового диапазона (2,5–4,5 млн руб.). При этом их решения ориентированы на исследовательские центры и крупные федеральные клиники, что оставляет нишу для доступных систем среднего ценового сегмента. Угроза новых входа оценена как умеренная (3,5): барьеры включают сертификацию медицинских изделий (12–18 месяцев), необходимость проведения клинических исследований и высокие первоначальные инвестиции в НИОКР (30–50 млн руб.).

Угроза замещения низкая (2,8 из 5): фитнес-трекеры и мобильные приложения для анализа движения не обеспечивают инструментальной точности, требуемой для клинической диагностики (погрешность бытовых устройств превышает 15 % против 2–3 % у профессиональных систем). Сила поставщиков умеренная (3,0): рынок MEMS-датчиков концентрирован (Bosch, STMicroelectronics, InvenSense), но существует несколько альтернативных производителей. Сила покупателей высокая (4,0): бюджетные учреждения чувствительны к цене и требуют доказательной базы эффективности.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Таблица 3

Оценка отраслевой привлекательности по модели Портера

Сила	Оценка	Интерпретация
Конкурентная борьба	3,5/5	Высокая: доминирование Vicon, Xsens, Qualisys
Угроза новых входа	3,5/5	Умеренная: барьеры сертификации и НИОКР
Угроза замещения	2,8/5	Низкая: фитнес-трекеры не заменяют диагностику
Сила поставщиков	3,0/5	Умеренная: несколько производителей MEMS
Сила покупателей	4,0/5	Высокая: чувствительность к цене
Интегральная оценка	**3,2/5**	**Умеренная привлекательность**

Интегральная оценка привлекательности отрасли — 3,2 из 5 (умеренная). Стратегия должна строиться на ценовой дифференциации и захвате ниши "доступная премиальная точность" — позиционирование между дорогими западными системами и неточными бытовыми решениями.

3.3. Ресурсный потенциал разработчика (VRIN-анализ)

Аудит ресурсов ООО "ВИБИОС" выявил три устойчивых конкурентных преимущества, отвечающих всем критериям VRIN-фреймворка: патентованная архитектура нейросетевого анализа движения (защищено двумя патентами РФ), эксклюзивные партнерства с тремя федеральными реабилитационными центрами (доступ к клиническим данным и пилотным площадкам), междисциплинарная команда, объединяющая компетенции в медицине, биомеханике и машинном обучении.

Пять ресурсов получили статус временных преимуществ: оптимизированные алгоритмы обработки сигналов, Agile-процессы разработки, контракты с региональными дистрибьюторами, ноу-хау в калибровке датчиков и наработанная база обучающих данных (более 15 000 записей движений). Два ресурса — сертификаты соответствия и производственные мощности — требуют развития для достижения конкурентоспособности.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Таблица 4

Результаты VRIN-анализа ресурсов ООО "ВИБИОС"

Ресурс	V	R	I	N	Статус
Патентованная архитектура	+	+	+	+	Устойчивое преимущество
Партнерства с клиниками	+	+	+	+	Устойчивое преимущество
Междисциплинарная команда	+	+	+	+	Устойчивое преимущество
Алгоритмы обработки	+	+	−	+	Временное преимущество
База данных движений	+	+	−	−	Временное преимущество
Agile-процессы	+	−	−	+	Временное преимущество

Компания обладает достаточным ресурсным потенциалом для входа на рынок, однако временные преимущества требуют срочного закрепления через организационное развитие: внедрение системы менеджмента качества ISO 13485:2017, расширение партнерской сети до 8–10 клиник и подача заявок на два дополнительных патента.

3.4. Пользовательские требования и барьеры (эмпирика)

Структура выборки (n = 93) отражала целевые сегменты: врачи-реабилитологи (32 респондента, 34 %), спортивные тренеры (26, 28 %), биомеханики (20, 22 %) и физиотерапевты (15, 16 %). Средний стаж работы — 11,4 года, 67 % респондентов имеют опыт использования цифровых диагностических инструментов.

Анализ требований к функциональности выявил иерархию приоритетов. Точность измерений возглавила рейтинг (среднее 4,9 из 5, медиана 5,0) — 91 % респондентов отметили этот параметр как критически важный. Real-time визуализация данных заняла второе место (4,7), за ней следуют предиктивная аналитика (4,6) и простота интерфейса (4,5). Интеграция с медицинскими информационными системами (МИС) получила меньший приоритет (3,8), что отражает текущий уровень цифровизации учреждений: многие региональные клиники не имеют развернутых МИС.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Таблица 5

Иерархия пользовательских требований (n = 93)

Параметр	Среднее	Критичность
Точность измерений	4,9/5	Критически важно (91 %)
Real-time визуализация	4,7/5	Высокая (84 %)
Предиктивная аналитика	4,6/5	Высокая (79 %)
Простота интерфейса	4,5/5	Высокая (76 %)
Интеграция с МИС	3,8/5	Умеренная (52 %)
Мобильность системы	4,3/5	Высокая (71 %)

Анализ барьеров внедрения выявил доминирующие препятствия. Высокая стоимость оборудования лидирует с большим отрывом (48,4 % упоминаний): стоимость Vicon в 3,5 млн руб. превышает годовой бюджет типичной региональной клиники на оборудование. Технические ограничения (43 %) включают сложность калибровки и требования к выделенному помещению. Сложность интеграции с МИС (43 %) создает дополнительные издержки на внедрение. Нехватка квалифицированного персонала для работы с системой отмечена 37 % респондентов.

Результаты дисперсионного анализа ANOVA выявили статистически значимые различия между профессиональными группами. Врачи требуют точности измерений ($M = 4,8$) значительно сильнее, чем тренеры ($M = 4,3$; $F = 7,92$; $p = 0,007$). Тренеры, в свою очередь, придают большую важность мобильности и скорости установки системы ($M = 4,6$ против $M = 3,9$ у врачей; $p = 0,012$). Эти различия критичны для сегментации ценового предложения: врачебный сегмент требует максимальной точности и готов платить премию, тренерский сегмент ценит мобильность и скорость работы.

Множественная линейная регрессия выявила факторы, предсказывающие готовность к покупке: размер учреждения ($\beta = 0,31$; $p < 0,001$), опыт использования интеллектуальных диагностических систем ($\beta = 0,28$; $p = 0,003$) и размер годового бюджета на оборудование ($\beta = 0,24$; $p = 0,008$). Совокупная модель объясняет 42 % дисперсии ($R^2 = 0,42$; $F = 21,37$; $p < 0,001$).

Экономический барьер имеет количественные границы. Цена 150 тыс. руб. за комплект воспринимается 45 % респондентов как приемлемая, 28 % — как высокая, но оправданная точностью. Порог в 250 тыс. руб. отсеивает 61 % потенциальных покупателей. Эти данные определяют целевой ценовой сегмент для стратегии выхода на рынок.

3.5. Экономическая модель и оценка рисков

Рыночная оценка построена по методологии TAM/SAM/SOM. Полный адресуемый рынок (TAM) сегмента ИИ-диагностики биомеханики в России прогнозируется на уровне

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

4,2 млрд руб. к 2028 году. Доступный рынок (SAM), ограниченный реабилитационными центрами, спортивной медициной и ортопедическими клиниками, оценивается в 850 млн руб. Реалистичная доля рынка (SOM) при консервативном сценарии — 8,5 %, или 72 млн руб. в годовом выражении.

Инвестиционные требования проекта составляют 45 млн руб., распределяемых по статьям: НИОКР (18 млн руб., 40 %), персонал (12 млн руб., 26,7 %), оборудование и компоненты (10 млн руб., 22,2 %), сертификация и клинические испытания (3 млн руб., 6,7 %), маркетинг и продажи (2 млн руб., 4,4 %).

Прогноз продаж базируется на консервативной модели проникновения: 100 комплектов в 2027 году, 300 в 2028, 500 в 2029 и 700 в 2030. Средняя цена реализации на старте — 180 тыс. руб. с ежегодной индексацией на 5 %. Выручка четвертого года достигнет 133 млн руб. при себестоимости 89 млн руб. и валовой прибыли 44 млн руб.

Таблица 6

Ключевые показатели экономической эффективности проекта

Показатель	Значение	Примечание
TAM (2028)	4,2 млрд руб.	Полный рынок ИИ-диагностики
SAM	850 млн руб.	Реабилитация, спортмед, ортопедия
SOM	72 млн руб./год	8,5 % доля рынка
NPV (15 %)	45,2 млн руб.	Положительная оценка
IRR	28,4 %	Выше стоимости капитала
DPP	3,2 года	Дисконтированный срок окупаемости
Точка безубыточности	389 компл./год	Второй год операционной деятельности
NPV (пессимистичный)	8,2 млн руб.	5-й перцентиль Монте-Карло

Сценарное моделирование методом Монте-Карло (10 000 итераций, треугольное распределение) продемонстрировало робастность проекта. Медиана NPV составила 45,0 млн руб., 25-й перцентиль — 25,7 млн руб., 75-й перцентиль — 70,7 млн руб. Даже в пессимистичном сценарии (5-й перцентиль) NPV положительна и составляет 8,2 млн руб. Вероятность отрицательного NPV — менее 3 %. Точка безубыточности достигается при продаже 389 комплектов в год, что соответствует второму году коммерческой эксплуатации.

Чувствительный анализ выявил ключевые драйверы риска: объем продаж (коэффициент эластичности NPV = 1,82), себестоимость производства (−1,45) и срок сертификации (−0,78). Управление этими переменными — приоритетная задача для минимизации рисков проекта.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

3.6. Синтез стратегических рекомендаций (SWOT/TOWS)

SWOT-матрица, построенная на результатах PESTEL, Портера, VRIN и эмпирики, выявляет четыре стратегических направления. Приоритетной является стратегия SO (максимальное использование сил для реализации возможностей), включающая конкретный план действий.

Первое направление — пилотные проекты в трех федеральных реабилитационных центрах (Москва, Санкт-Петербург, Казань). Реализация пилотов создаст доказательную базу для участия в тендерах и формирует референс-лист для последующих продаж. Второе направление — подача заявки на грант Фонда Сколково в размере 20 млн руб., покрывающего 44 % инвестиций в НИОКР. Третье — параллельная подготовка досье для Росздравнадзора на регистрацию изделия класса 2а, что сократит время выхода на рынок на 6–8 месяцев.

Четвертое направление адресовано преодолению ценового барьера. Гибкая модель оплаты включает рассрочку на 12 месяцев (первый взнос 30 %), лизинговые программы через партнеров и подписочную модель (15–20 тыс. руб./мес. с включенным обслуживанием и обновлениями). Пятая мера — интеграционный модуль API HL7 FHIR "из коробки", снижающий барьер внедрения для клиник с развернутыми МИС.

Таблица 7

SWOT-матрица и приоритетные стратегические меры

	Помогает достичь цели	Мешает достичь цели
Внутренние	S: патенты, партнерства, команда, алгоритмы	W: отсутствие сертификатов, ограниченные мощности
Внешние	O: программы импортозамещения, рост рынка	T: конкуренты, валютные риски, регуляторика

Приоритетные меры (стратегия SO): пилоты в 3 федеральных центрах; грант Сколково (20 млн руб.); подготовка досье Росздравнадзора (класс 2а); гибкая модель оплаты (рассрочка, лизинг, подписка 15–20 тыс./мес.); интеграционный модуль HL7 FHIR.

4. Заключение

Исследование разработало и апробировало комплексную методику выведения интеллектуальных диагностических систем на рынок HealthTech. Интегральная оценка макросреды (+14,1) и умеренная привлекательность отрасли (3,2 из 5) создают достаточные условия для успешного маркетового входа. Экономическая модель подтвердила жизнеспособность проекта: NPV = 45,2 млн руб., IRR = 28,4 %, срок окупаемости 3,2 года.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

На основе полученных результатов сформулированы три конкретные рекомендации. Для разработчиков high-tech медицинских продуктов: стратегический аудит (PESTEL + Портер + VRIN) должен проводиться параллельно с разработкой прототипа, а не после его завершения. Такой подход снижает риск попадания в "долину смерти" на 30–40 % за счет раннего выявления рыночных и регуляторных барьеров.

Для государственной политики импортозамещения в медтехе: необходимы ускоренные треки сертификации для отечественных разработок класса 2а и механизмы субсидирования первых пилотных внедрений в федеральных центрах. Текущие сроки регистрации (12–18 месяцев) ставят отечественных разработчиков в невыгодное положение по сравнению с ускоренными процедурами в юрисдикциях FDA (510(k)) и CE MDR.

Для инвесторов HealthTech: оценка стартапа должна включать не только технологический аудит, но и ресурсный аудит по VRIN-фреймворку. Наличие хотя бы двух устойчивых преимуществ (патентная защита + эксклюзивные партнерства) повышает вероятность успешной коммерциализации с 35 % до 68 % по данным выборки.

Дальнейшие исследования должны включить лонгитюдное наблюдение за пилотными внедрениями системы и адаптацию методики для смежных сегментов — педиатрической и гериатрической диагностики движения, где специфика пользовательских требований и регуляторных барьеров существенно отличается от общей реабилитационной практики.

References

1. Global AI in Healthcare Market Report 2024 / MarketsandMarkets Research. — 2024. — URL: https://www.marketsandmarkets.com (дата обращения: 15.03.2026).

2. Указ Президента РФ от 10.05.2022 № 250 "О государственной программе Российской Федерации "Развитие здравоохранения"" // СПС "Гарант".

3. Трачук А.В., Линдер Н.В. Импортозависимость и технологический суверенитет в медицинской промышленности // Экономика и предпринимательство. — 2024. — № 4. — С. 112–118.

4. Аналитический обзор рынка медицинских технологий 2024 / Фонд Сколково. — М., 2024. — 86 с.

5. Halilaj E. et al. Machine learning in human movement biomechanics: Best practices, common pitfalls, and new opportunities // Journal of Biomechanics. — 2020. — Vol. 81. — P. 1–11.

6. Osterwalder A., Pigneur Y. Business Model Generation: A Handbook for Visionaries, Game Changers, and Challengers. — Hoboken: John Wiley & Sons, 2010. — 278 p.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

7. Трачук А.В., Линдер Н.В. Принятие решений о внедрении искусственного интеллекта и трансформация источников некопируемых конкурентных преимуществ // Стратегические решения и риск-менеджмент. — 2024. — Т. 15, № 2. — С. 134–151.

8. Авдеева И.А., Кузнецов П.В. Коммерциализация медицинских технологий: интеграция стратегического анализа и пользовательской эмпирики // Инновации. — 2025. — № 3. — С. 45–58.

9. Porter M.E. Competitive Strategy: Techniques for Analyzing Industries and Competitors. — New York: Free Press, 1980. — 396 p.

10. Barney J. Firm Resources and Sustained Competitive Advantage // Journal of Management. — 1991. — Vol. 17, № 1. — P. 99–120.

11. Федеральный закон от 27.07.2006 № 152-ФЗ "О персональных данных" // Собрание законодательства РФ. — 2006. — № 31 (ч. I). — Ст. 3451.

12. Федеральный закон от 21.11.2011 № 323-ФЗ "Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации" // Собрание законодательства РФ. — 2011. — № 48. — Ст. 6724.

13. ГОСТ Р ИСО 13485-2017. Системы менеджмента качества. Медицинские изделия.

14. Vaswani A. et al. Attention Is All You Need // Advances in Neural Information Processing Systems. — 2017. — Vol. 30. — P. 5998–6008.

15. Saaty T.L. The Analytic Hierarchy Process. — New York: McGraw-Hill, 1980. — 324 p.

16. Musculoskeletal Health in Europe: Report on the Burden of Musculoskeletal Diseases / WHO European Health Information Gateway. — 2023. — URL: https://gateway.euro.who.int (дата обращения: 10.04.2026).

17. Превалентность заболеваний опорно-двигательного аппарата в Российской Федерации / Федеральный центр охраны здоровья. — 2024. — URL: https://fcmz.ru (дата обращения: 12.04.2026).

18. Ким Е.В., Васильев Д.В. Стратегии выхода на рынок для медтех-стартапов: обзор подходов // Вестник Финансового университета. — 2024. — Т. 10, № 2. — С. 88–102.

19. Teece D.J. Business models, business strategy and innovation // Long Range Planning. — 2010. — Vol. 43, № 2. — P. 172–194.

20. Руководство по сертификации медицинских изделий / Росздравнадзор. — М., 2023. — 156 с.

21. Смирнова Е.А., Козлов А.П. Моделирование рисков инновационных проектов методом Монте-Карло // Экономический анализ: теория и практика. — 2023. — Т. 22, № 12. — С. 2341–2358.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

22. Приказ Минздрава России от 06.05.2021 № 383н "Об утверждении правил регистрации медицинских изделий" // Российская газета. — 2021. — № 130.

23. HL7 FHIR Release 4: Electronic Health Records Exchange Specification / Health Level Seven International. — 2020. — URL: https://www.hl7.org/fhir (дата обращения: 05.04.2026).

24. Чернова О.В. Пользовательский опыт в медицинских информационных системах: барьеры и драйверы внедрения // Информационные технологии. — 2024. — № 8. — С. 34–41.

25. Kaplan R.S., Norton D.P. The Balanced Scorecard: Translating Strategy into Action. — Boston: Harvard Business School Press, 1996. — 322 p.

26. Григорьев С.В., Давыдова А.М. Государственная поддержка инновационных медицинских технологий: сравнительный анализ режимов // Журнал инновационной экономики. — 2024. — Т. 14, № 1. — С. 67–82.

27. Prevalence and Disability from Musculoskeletal Conditions / Global Burden of Disease Study 2021 // The Lancet Rheumatology. — 2023. — Vol. 5, № 9. — P. e546–e558.

28. Захаров И.П., Петрова Е.С. Смешанные методы в социологии здоровья: дизайн, процедуры, ограничения // Социология медицины. — 2023. — Т. 26, № 3. — С. 12–19.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 61

Puzankova N.V., Kukushkin D.V. The impact of coronary angiography and subsequent revascularization on the quality of life in patients with coronary artery disease

Влияние коронароангиографии и последующей реваскуляризации на качество жизни пациентов с ишемической болезнью сердца

Puzankova Natalia Vladimirovna,
Senior Lecturer, Department of Internal Medicine,
Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel
Kukushkin Denis Viktorovich,
Candidate of Medical Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Internal Medicine,
Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel
Пузанкова Наталия Владимировна,
старший преподаватель кафедры внутренних болезней, ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева», г. Орёл
Кукушкин Денис Викторович,
к.м.н, доцент кафедры внутренних болезней, ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева», г. Орёл

Abstract. *The article examines the impact of coronary angiography and subsequent revascularization on the quality of life in patients with coronary artery disease.*

Background*. Coronary angiography (CAG) and subsequent myocardial revascularization are widely used in acute coronary syndrome; however, assessment of patients' quality of life (QoL) in routine practice remains insufficient.*

Objective. *To analyze the impact of CAG and revascularization on patients' quality of life based on data from contemporary studies.*

Material and methods*. A review of Russian and international publications was conducted, utilizing standardized questionnaires SF-36 and SAQ to assess the physical and mental health components in patients with coronary artery disease (CAD) after invasive interventions.*

Results. *A statistically and clinically significant improvement in QoL was demonstrated at 1, 3, and 6 months after the procedures. The physical component summary (PCS) recovers more slowly than the mental component summary (MCS). Factors associated with worse QoL after revascularization include type 2 diabetes mellitus, obesity, prior stroke, heart failure, multivessel disease, and in-stent restenosis. Women and patients with high baseline anxiety levels have lower QoL scores. The greatest potential for improvement is observed in elderly patients with low baseline QoL and high cholesterol levels.*

Conclusion. *CAG followed by revascularization significantly improves QoL in the short and long term. However, the degree of improvement depends on a combination of clinical, angiographic, and sociodemographic factors, necessitating their consideration when deciding on the intervention.*

Keywords: *coronary angiography, quality of life, SF-36, Seattle Angina Questionnaire (SAQ), predictors.*

Аннотация. *В статье рассматривается влияние коронароангиографии и последующей реваскуляризации на качество жизни пациентов с ишемической болезнью сердца.*

Актуальность. *Коронароангиография (КАГ) и последующая реваскуляризация миокарда широко применяются при остром коронарном синдроме, однако оценка качества жизни (КЖ) пациентов в рутинной практике используется недостаточно.*

Цель *– анализ влияния КАГ и реваскуляризации на качество жизни пациентов на основе данных современных исследований.*

Материал и методы*. Проведен обзор российских и зарубежных публикаций, использующих стандартизированные опросники SF-36 и SAQ для оценки физического и ментального компонентов здоровья у пациентов с ИБС после инвазивных вмешательств.*

Результаты. *Продемонстрировано статистически и клинически значимое улучшение КЖ через 1, 3 и 6 месяцев после процедур. Физический компонент здоровья (PCS) восстанавливается медленнее ментального (MCS). Факторами, ассоциированными с худшим КЖ после реваскуляризации, являются сахарный диабет 2 типа,*

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

ожирение, перенесенный инсульт, сердечная недостаточность, многососудистое поражение и рестеноз в стенте. Женщины и пациенты с высоким уровнем тревожности исходно имеют более низкие показатели КЖ. Наибольший потенциал улучшения наблюдается у пожилых пациентов с исходно низким КЖ и высоким уровнем холестерина.

Заключение. *КАГ с последующей реваскуляризацией значимо улучшает КЖ в кратко- и долгосрочном периоде, однако степень улучшения зависит от комбинации клинических, ангиографических и социально-демографических факторов, что требует их учета при принятии решения о вмешательстве.*

Ключевые слова*: коронароангиография, качество жизни, SF-36, Сиэтлский опросник стенокардии (SAQ), предикторы.*

Рецензент: Сагитов Рамиль Фаргатович - кандидат технических наук, доцент. Заместитель директора, главный научный сотрудник. ООО «Научно-исследовательский проектный институт «Промышленное и гражданское строительство»

Современные международные регистры демонстрируют высокую частоту выполнения коронароангиографии (КАГ) у пациентов с острым коронарным синдромом. Качество жизни является одним из ключевых критериев эффективности медицинских вмешательств в современной кардиологии. Для его оценки используются стандартизированные опросники: SF-36 (Short Form-36), оценивающие физические и психоэмоциональные компоненты здоровья, и SAQ (Seattle Angina Questionnaire), позволяющий количественно оценить влияние стенокардии на повседневную активность пациента [2].

Актуальность данной темы обусловлена недостаточно частым использованием оценки качества жизни в клинической практике врача, что тем самым не позволяет в полной мере оценить субъективное восприятие пациентом состояния своего здоровья.

Цель - оценить влияние коронароангиографии и последующей реваскуляризации на качество жизни пациентов.

Результаты и обсуждения.

В исследовании, проведенном А.С. Клинковой и соавторами (2021), были проанализированы изменения качества жизни у 658 больных с ОКС на фоне ИБС, поступивших для экстренной реваскуляризации миокарда в период пандемии COVID-19. Средний возраст пациентов составил 66,4 ± 4,3 года. При анализе суммарных значений шкал было отмечено, что через 6 месяцев после реваскуляризации миокарда у исследуемой группы пациентов наиболее снижен (< 40 баллов) физический аспект здоровья (PCS). Суммарный показатель ментального компонента (MCS) оказался достоверно выше физического ($p < 0,002$), но в тоже время его показатель не превышает 50 баллов, что отражает средний уровень душевного благополучия у данных больных. Для выявления предикторов изменения параметров качества жизни, А.С. Клинкова и соавторы провели многофакторный регрессионный анализ, который показал, что на низкий уровень влияет наличие в анамнезе сахарного диабета 2-го типа, ожирения, хронической ишемии нижних конечностей, инсульта, сердечной недостаточности в

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

раннем послеоперационном периоде. Авторы отмечают, что заражение COVID-19 также значимо снижали показатели общего состояния здоровья [1].

По данным исследования, проведенном в Китае, с участием 197 пациентов после стентирования коронарных артерий было подтверждено значительное улучшение качества жизни. По данным SF-36, все восемь шкал качества жизни продемонстрировали статистически значимое повышение через 3 месяца после вмешательства по сравнению с дооперационным уровнем ($p < 0,05$). По данным SAQ, четыре из пяти доменов (физическая активность, стабильность стенокардии, частота приступов и восприятие болезни) показали значимое улучшение [6].

В исследовании Tavella R. и Beltrame J.F. (2012) было показано, что у пациентов с подтвержденным коронарным атеросклерозом уже через 1 месяц после проведения коронароангиографии отмечается улучшение показателей качества жизни, которое сохраняется и через 6 месяцев наблюдения. При этом участие в программах кардиореабилитации не оказывало дополнительного влияния на динамику качества жизни, что подчеркивает ключевую роль самой диагностической процедуры и последующей тактики лечения в улучшении самочувствия пациентов [4].

В исследовании Yel P. и Ünsar S. (2020) было выявлено, что женщины имеют более низкие показатели качества жизни и более высокий уровень тревожности по сравнению с мужчинами при проведении коронароангиографии. Личностные характеристики (возраст, семейное положение, уровень образования, доход) и особенности заболевания (клинический диагноз, прием лекарственных препаратов) также оказывают значимое влияние на качество жизни и уровень тревожности пациентов. Установлена обратная корреляционная связь между уровнем тревожности и качеством жизни: чем выше тревожность, тем ниже показатели КЖ [5].

На основании анализа данных нескольких исследований выделены факторы, ассоциированные с более выраженным улучшением качества жизни после коронароангиографии и реваскуляризации [1,3,6]:

Благоприятные факторы:

- Исходно низкое качество жизни (больший потенциал для улучшения)
- Пожилой возраст
- Высокий уровень общего холестерина до лечения

Неблагоприятные факторы:

- Сахарный диабет
- Наличие в анамнезе острого нарушения мозгового кровообращения
- Многососудистое поражение коронарного русла
- Рестеноз в стенте после предшествующего ЧКВ

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Заключение. Высокая эффективность коронароангиографии с последующей реваскуляризацией миокарда (при наличии показаний) приводит к статистически и клинически значимому улучшению состояния пациентов в краткосрочном и долгосрочном периоде наблюдения. Степень качества жизни зависит от комбинации клинических, ангиографических и социально-демографических факторов, которые должны учитываться при принятии решения о проведении инвазивного вмешательства.

References

1. Клинкова А.С., Каменская О.В., Логинова И.Ю., Чернявский А.М., Ломиворотов В.В. Качество жизни после реваскуляризации миокарда у пациентов, перенесших острый коронарный синдром в период пандемии COVID-19, по данным проспективного наблюдения. Патология кровообращения и кардиохирургия. 2021;25(4):64-75.

2. Орехова Ю.Н., Иванченко Д.Н., Дорофеева Н.П., Коломацкая О.Е. Сравнение информативности опросника SF-36 и Сиэтлского опросника для оценки качества жизни у пациентов со стабильной ИБС после коронарного стентирования с учётом психоэмоционального состояния. Южно-Российский журнал терапевтической практики. 2026;7(1):97-105. \

3. Orekhova Yu.N., Ivanchenko D.N., Dorofeeva N.P., Kolomatskaya O.E. Comparison of SF-36 and Seattle angina questionnaire for evaluation the quality of life in patients with stable ischemic heart disease after percutaneous coronary intervention, taking into account mental health status. South Russian Journal of Therapeutic Practice. 2026;7(1):97-105.

4. Сваровская А.В., Огуркова О.Н., Аржаник М.Б., Вендэ А.Д., Чебуранова В.Д., Гарганеева А.А. Независимые предикторы неблагоприятных исходов у пациентов со стабильной ишемической болезнью сердца после плановых чрескожных коронарных вмешательств. Профилактическая медицина. 2024;27(11):94-101.\

5. Svarovskaya AV, Ogurkova ON, Arzhanik MB, Vende AD, Cheburanova VD, Garganeeva AA. Independent adverse outcomes predictors in patients with stable coronary heart disease after scheduled percutaneous coronary interventions. Russian Journal of Preventive Medicine. 2024;27(11):94-101. \\

6. Tavella R., Beltrame J.F. Cardiac rehabilitation may not provide a quality of life benefit in coronary artery disease patients // BMC Health Services Research. 2012. Vol. 12, No. 406. P. 2-9. DOI: 10.1186/1472-6963-12-406.

7. Yel P., Ünsar S. Quality of Life and Anxiety Levels of Patients with Coronary Angiography // Turkish Journal of Cardiovascular Nursing. 2020. Vol. 11, No. 24. P. 7-15.

8. 冠心病患者经皮冠状动脉介入治疗后生活质量及其影响因素分析// 中国循证心血管医学杂志. 2016. № 4.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 159.9.072.432

Semenchuk R.I. Correction of situational anxiety in outpatient medical interventions through short-term acceptance and responsibility therapy

Коррекция ситуативной тревожности в амбулаторных медицинских вмешательствах с помощью краткосрочной терапии принятия и ответственности

Semenchuk Ruslan Ivanovich,
Master's student in the Department of Pedagogy and Psychology, Humanities and Pedagogical Institute, Togliatti State University, Togliatti (Russia); clinical psychologist.
Supervisor: **Sedova Irina Viktorovna**
Associate Professor, PhD in Psychology
Department of Pedagogy and Psychology, Humanities and Pedagogical Institute
Семенчук Руслан Иванович,
студент магистрант кафедры "Педагогика и психология", Гуманитарно-педагогический институт, Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия); клинический психолог.
Научный руководитель: Седова Ирина Викторовна
Доцент, Кандидат психологических наук
Кафедра "Педагогика и психология", Гуманитарно-педагогический институт

Abstract. *The article substantiates the use of brief Acceptance and Commitment Therapy (ACT) interventions to reduce situational anxiety in patients before outpatient medical procedures. A review of the theoretical foundations of ACT is presented, including the psychological flexibility model and relational frame theory. Factors and mechanisms of procedural anxiety are considered, along with data from recent meta-analyses and randomized controlled trials confirming the effectiveness of ultra-brief ACT interventions (15–30 minutes) in dentistry, gastroenterology, and surgery. Based on the Focused ACT model, a 15–20-minute protocol consisting of six steps is developed and described: psychoeducation, the "weather outside the window" metaphor, cognitive defusion, mindful breathing, values clarification, and committed action. The advantages and limitations of the approach are discussed, and recommendations for implementing the protocol in the work of clinical psychologists and trained medical staff in outpatient settings are given.*

Keywords: *acceptance and commitment therapy, psychological flexibility, situational anxiety, outpatient procedures, brief interventions, Focused ACT.*

Аннотация. *Статья посвящена обоснованию применения краткосрочных интервенций на основе терапии принятия и ответственности (ACT) для снижения ситуативной тревожности у пациентов перед амбулаторными медицинскими процедурами. Представлен обзор теоретических оснований ACT, включая модель психологической гибкости и теорию реляционного фрейминга. Рассмотрены факторы и механизмы процедурной тревоги, а также данные современных мета-анализов и рандомизированных контролируемых исследований, подтверждающие эффективность ультра-коротких ACT-интервенций (15–30 минут) в стоматологии, гастроэнтерологии и хирургии. На основе модели Focused ACT разработан и описан 15–20-минутный протокол, состоящий из шести шагов: психообразование, метафора «погода за окном», когнитивное разделение, осознанное дыхание, прояснение ценностей и проактивное действие. Обсуждаются преимущества и ограничения подхода, даются рекомендации по внедрению протокола в работу клинических психологов и обученного медицинского персонала амбулаторного звена.*

Ключевые слова: *терапия принятия и ответственности, психологическая гибкость, ситуативная тревожность, амбулаторные вмешательства, краткосрочные интервенции, Focused ACT.*

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Рецензент: Сагитов Рамиль Фаргатович - кандидат технических наук, доцент. Заместитель директора, главный научный сотрудник. ООО «Научно-исследовательский проектный институт «Промышленное и гражданское строительство»

Тревога, которая охватывает человека перед визитом к врачу, — явление знакомое едва ли не каждому. Даже простые манипуляции вроде забора крови, гастроскопии или МРТ могут вызывать сильное беспокойство, сердцебиение и мышечное напряжение. По разным оценкам, от 60 до 80 % пациентов поликлиник признаются, что перед процедурами испытывают заметный дискомфорт [1; 2; 3]. Примерно каждый десятый из-за страха вообще отказывается от предложенного обследования или лечения, что неизбежно сказывается на своевременности диагноза [4].

Сегодня врачи чаще всего справляются с такой тревогой с помощью успокоительных препаратов (бензодиазепинов), подробных разъяснений или дыхательных техник. У каждого из этих способов есть свои минусы. Лекарства требуют присутствия анестезиолога, могут дать нежелательные реакции — от излишней сонливости до парадоксального возбуждения, к тому же после них пациенту нельзя садиться за руль. Разъяснения, хотя и полезны, далеко не всегда успокаивают, потому что тревога часто сидит глубже — она подпитывается не нехваткой знаний, а стремлением избежать неприятных ощущений и мыслей [5; 6]. Релаксационные методы требуют тренировки и спокойной обстановки, что трудно организовать в коридоре поликлиники, где всё решается за минуты.

Поэтому так важно найти способ, который работал бы быстро, не требовал лекарств и мог применяться буквально «на ходу». Один из самых многообещающих подходов здесь — терапия принятия и ответственности (Acceptance and Commitment Therapy, ACT). Она возникла в рамках «третьей волны» когнитивно-поведенческой терапии, её авторы — С. Хейс, К. Штросаль и К. Уилсон. Суть не в том, чтобы убрать страх, а в том, чтобы развить у человека психологическую гибкость: способность замечать свои тревожные мысли и чувства и при этом продолжать делать то, что по-настоящему важно для него [7]. За рубежом накопилось немало данных о том, что даже 15–30-минутные встречи в формате ACT заметно облегчают состояние перед медицинскими процедурами [8; 9]. В России же таких исследований почти нет, и готовых протоколов для наших поликлиник не существует.

Цель этой статьи — обосновать, почему короткие ACT-интервенции могут быть полезны для снижения ситуативной тревожности в российском амбулаторном звене, и предложить конкретный протокол, учитывающий нашу культурную специфику.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Методы

Мы провели обзор научной литературы за 2012–2025 годы. Поиск вели в базах PubMed, PsycINFO и Научной электронной библиотеке eLibrary. Ключевые слова искали как на английском, так и на русском языке: «acceptance and commitment therapy», «brief intervention», «situational anxiety», «procedural anxiety», «dental anxiety» и их русские эквиваленты. Кроме того, просмотрели пристатейные списки, чтобы не пропустить стоящие работы, не попавшие в основную выдачу.

В обзор включали:

– мета-анализы и систематические обзоры по ACT при тревожных расстройствах и соматическом дистрессе;

– рандомизированные контролируемые испытания, где изучали эффект однократной или короткой (до 30 минут) ACT-интервенции на уровень реактивной тревоги перед медицинскими процедурами;

– теоретические публикации, разъясняющие ключевые процессы ACT, теорию реляционного фрейминга и модель психологической гибкости.

Отбирали только публикации в рецензируемых журналах с доступным полным текстом и указанием величины эффекта (Cohen’s d или Hedges’ g). Преимущество отдавали работам последних пяти лет (2021–2025), чтобы отразить современное состояние проблемы.

Всего нашли 87 источников. После удаления дубликатов и поверхностного знакомства с аннотациями для детального анализа оставили 42 статьи, из которых в итоговый список вошли 20 наиболее значимых.

За основу для разработки протокола взяли модель Focused Acceptance and Commitment Therapy (FACT), предложенную К. Штросалем и П. Робинсоном и уже адаптированную для медицины [7; 10]. FACT — это короткая (15–30 минут) схема консультирования, которая помогает быстро заметить привычку избегать неприятных переживаний, нащупать то, ради чего стоит действовать, и сделать конкретный шаг, несмотря на дискомфорт. Выбор пал на FACT из-за её простоты, воспроизводимости и доказанной эффективности в условиях нехватки времени.

Адаптируя протокол к нашей среде, мы особенно тщательно подбирали метафору. Она должна быть понятна русскоязычному пациенту, не вызывать отторжения и легко запоминаться. Перебрав несколько вариантов, остановились на образе «погоды за окном» — он нейтрален, не предполагает борьбы и хорошо согласуется с привычкой действовать вопреки внешним помехам.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Результаты

Теоретическая основа ACT и модель психологической гибкости

ACT опирается на функциональный контекстуализм и теорию реляционного фрейминга. Последняя объясняет, каким образом человек начинает страдать даже при отсутствии реальной угрозы: мы с помощью языка связываем нейтральные стимулы с негативными переживаниями [7; 10]. Например, пациент, однажды испытавший боль у стоматолога, выстраивает связку «бормашина — боль», и потом одна мысль о предстоящем визите запускает полноценную тревожную реакцию.

Ключевое понятие ACT — психологическая гибкость. Это умение полно и осознанно находиться в текущем моменте и выбирать поведение, которое служит личным ценностям, даже когда внутри буря. Психологическая гибкость складывается из шести взаимосвязанных процессов: принятия (готовности переживать неприятные эмоции, не борясь с ними), когнитивного разделения (способности смотреть на свои мысли со стороны, как на проходящие события, а не на точное отражение реальности), осознанности настоящего, позиции наблюдателя («Я-как-контекст»), ценностей и проактивных действий (реальных шагов к тому, что важно, несмотря на дискомфорт) [7].

В отличие от классической когнитивной терапии, ACT не пытается переубедить человека, доказав, что его страхи преувеличены. Вместо этого она меняет саму функцию мыслей: «эта процедура будет ужасна» перестаёт быть командой к бегству и становится просто шумом в голове, на который можно не обращать внимания. Такой подход особенно выигрывает в ситуациях острого стресса, когда рациональные доводы плохо доходят до перегруженного эмоциями мозга [11; 16].

Факторы и механизмы процедурной тревоги

Анализ источников показывает, что предпроцедурная тревога питается сразу из нескольких источников. Конечно, играет роль нехватка информации, но гораздо сильнее влияют личностная тревожность, неприятие неопределённости и прошлый негативный опыт [2; 4]. Отдельно стоит выделить так называемое экспериментальное избегание — попытки задавить, не замечать или убежать от неприятных мыслей и ощущений, связанных с процедурой. Парадокс в том, что чем сильнее человек старается не думать о страхе, тем громче страх заявляет о себе. Возникает замкнутый круг: борьба с тревогой лишь подбрасывает дров в костёр [12]. Именно поэтому подход, который напрямую работает с избеганием и слиянием с мыслями, может дать больше, чем простое информирование или релаксация.

К этому добавляется обстановка типичной поликлиники: очереди, шум, короткое общение с врачом, отсутствие психолога. В таких условиях нужны методы, которые занимают минуты и не требуют долгого обучения.

Эффективность краткосрочных ACT-интервенций: данные исследований

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

На сегодняшний день накопилось достаточно данных, чтобы говорить о действенности ACT. В мета-анализе J. N. Kelson и соавторов (2025), охватившем 23 РКИ, средний размер эффекта при тревожных расстройствах составил g ≈ 0,5 — это сопоставимо с когнитивно-поведенческой терапией. При этом тревога снижалась прежде всего за счёт ослабления экспериментального избегания и когнитивного слияния [8].

В том же обзоре отдельно рассмотрели 14 исследований сверхкоротких интервенций, основанных на осознанности и принятии, в условиях медицинских учреждений (из них 9 — по ACT). Эффект оказался небольшим, но статистически значимым: для тревоги g = 0,34 (95 % ДИ [0,21; 0,47]), для поведенческой податливости OR = 1,62. Это значит, что даже одна 15–30-минутная встреча реально помогает.

Конкретные испытания подтверждают эту картину. Smith и соавторы (2022) случайным образом распределили 90 пациентов перед колоноскопией в три группы: 15-минутная ACT-беседа, поддерживающее слушание и обычная процедура без психологической помощи. В группе ACT тревожность по шкале STAI-State упала значительно сильнее (d = 0,52), причём эффект сохранялся и спустя полчаса после окончания процедуры [8].

В стоматологии получены похожие результаты: 20-минутная сессия ACT непосредственно перед уколом анестетика заметно снижала страх и делала укол менее болезненным по сравнению с обычным инструктированием [13]. В эксперименте A. L. Wagener и коллег (2016) участникам давали вдохнуть смесь с 35 % CO_2, вызывающую панические ощущения. Те, кто прошёл перед этим 30-минутную ACT-интервенцию, переносили пробу значительно легче и быстрее восстанавливались, чем испытуемые из группы плацебо-поддержки [14].

В ортопедии M. E. Levin и соавторы (2021) провели часовой семинар по ACT для пациентов, которым предстояла операция на позвоночнике. После семинара у них снизились катастрофизация боли, страх движений и предоперационная тревога [15]. Хотя формат часового занятия уже выходит за рамки «ультракороткого», он подтверждает, что даже разовая встреча даёт ощутимый результат.

Любопытно, что механизм действия ACT при острой тревоге принципиально иной, чем у релаксации или когнитивного переструктурирования. Медиаторный анализ показывает: тревога уходит не потому, что мысли стали «правильнее» или реже, а потому что пациент перестаёт с ними сливаться и избегать [8; 11]. Это прямое указание на то, что в коротких протоколах нужно делать ставку именно на разделение и принятие, а не на рациональные споры.

Разработанный протокол краткосрочной ACT-интервенции

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Опираясь на модель FACT и рассмотренные данные, мы составили алгоритм на 15–20 минут, который можно использовать прямо перед процедурой в амбулаторных условиях. Он включает шесть шагов, каждый из которых запускает один или несколько компонентов психологической гибкости.

1. Психообразование (2 минуты). Пациенту коротко объясняют: «Тревога — это нормальная реакция на неопределённость. Попытки задавить её обычно только усиливают напряжение». Это готовит почву для принятия.

2. Метафора «погода за окном» (3 минуты). Человеку предлагают представить тревогу как ненастье за окном. Дождь не прекратится от того, что мы будем его ругать или пытаться вытереть небо тряпкой. Зато можно надеть плащ, взять зонт и пойти по делам. Метафора показывает: дискомфорт может оставаться, но он больше не управляет нашими поступками. Она лишена агрессивного подтекста и хорошо ложится на российский менталитет с его привычкой действовать вопреки внешним помехам.

3. Когнитивное разделение (3 минуты). Используется техника «Назови ум». Пациента просят добавить перед пугающей мыслью фразу «Мой ум говорит, что…». Например: «Мой ум говорит, что будет очень больно». Такой нехитрый приём создаёт дистанцию между человеком и его мыслью, снижая её буквальность.

4. Осознанное дыхание (2 минуты). Короткая концентрация на вдохе и выдохе. Пациента просят просто наблюдать за дыханием и, заметив, что мысли ушли в сторону, мягко возвращать внимание обратно. Это заземляет и ослабляет тревожную умственную жвачку.

5. Прояснение ценностей (3 минуты). Задаются вопросы: «Почему для Вас важно пройти эту процедуру? Что ценного Вы получите, преодолев страх?» Ответы связываются с жизненными ценностями — здоровьем, заботой о семье, работой, возможностью вести активную жизнь.

6. Проактивное действие (2 минуты). Финальное приглашение: «Тревога может остаться с Вами, но теперь Вы знаете, ради чего готовы её принять. Сделайте этот шаг ради своего здоровья».

Весь протокол не требует специального оборудования, его можно провести в любом тихом уголке, даже в коридоре перед кабинетом. При небольшом обучении с ним справится не только психолог, но и медсестра или другой подготовленный сотрудник.

Обсуждение

Проведённый анализ убеждает, что короткие ACT-интервенции — это действительно рабочий и удобный инструмент для снижения ситуативной тревожности в поликлиниках. Наши выводы перекликаются с более ранними работами, показывавшими, что разовые встречи в стиле ACT способны значимо смягчить и

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

субъективный дистресс, и физиологические проявления тревоги перед медицинскими манипуляциями [15; 16]. Да, размер эффекта у сверхкоротких форматов скромнее, чем у полноценной терапии (g = 0,34), но для 15–20-минутного разговора это весьма достойный результат, сравнимый с действием некоторых успокоительных препаратов.

У предлагаемого протокола есть несколько сильных сторон. Во-первых, он не требует от пациента никакой предварительной подготовки и может применяться однократно. Во-вторых, он бьёт прямо в корень проблемы — в экспериментальное избегание и когнитивное слияние, а не только в поверхностные симптомы. В-третьих, метафора «погода за окном» культурно релевантна: она опирается на знакомый каждому россиянину опыт — делать своё дело, невзирая на капризы погоды.

Конечно, у нашего обзора и у всей этой области исследований есть ограничения. Во-первых, подавляющее большинство работ выполнено на западных выборках, и механически переносить их выводы на наших пациентов нельзя — нужна кросс-культурная проверка. Во-вторых, во многих испытаниях нет активной контрольной группы (например, просто поддерживающей беседы), что мешает понять, за счёт чего именно работает ACT. В-третьих, долгосрочные эффекты однократных интервенций почти не изучены: обычно тревогу замеряют сразу после процедуры и на этом ставят точку. Наконец, выборки в большинстве РКИ невелики (не больше 30 человек в группе), что снижает статистическую надёжность.

Выводы

1. Терапия принятия и ответственности имеет под собой солидную научную базу. Её эффективность в снижении тревоги подтверждена мета-анализами и РКИ. Главный рычаг изменений — рост психологической гибкости, прежде всего уменьшение экспериментального избегания и когнитивного слияния.

2. Ультракороткие варианты ACT, в частности FACT, позволяют за 15–20 минут заметно снизить реактивную тревогу перед амбулаторными процедурами. Размер эффекта — g = 0,34 для тревоги и OR = 1,62 для готовности следовать врачебным рекомендациям.

3. Разработанный протокол с метафорой «погода за окном» — технологичный, культурно адаптированный и легко воспроизводимый инструмент. Он может быть встроен в работу не только клинических психологов, но и обученного среднего медперсонала.

Заключение

Предложенный краткосрочный протокол ACT-интервенции может быть немедленно внедрён в практику работы психотерапевтических отделений и поликлиник. Для этого целесообразно организовать обучение медицинских сестёр и фельдшеров базовым навыкам проведения короткой сессии ACT. Обучение может проводиться в

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

формате 2–3-часового семинара, включающего отработку метафоры «погода за окном», техники «Назови ум» и осознанного дыхания. Пилотное внедрение протокола возможно в частных клиниках, имеющих в штате клинического психолога. Полученные после внедрения данные о снижении тревожности и повышении комплаентности пациентов могут стать основой для масштабирования метода на уровне первичного звена здравоохранения. Кроме того, протокол может быть использован в учебных программах по клинической психологии и психотерапии для знакомства студентов с современными техниками работы с острой тревогой.

References

1. Абабков В.А., Перре М. Адаптация к стрессу. Основы теории, диагностики, терапии. СПб.: Речь, 2021. 166 с.
2. Бохан Т.Г., Терехина О.В., Шабаловская М.В. Психологическая гибкость и жизнестойкость у клиентов с хроническими соматическими заболеваниями // Сибирский психологический журнал. 2021. № 81. С. 163–182.
3. Овчинников А.А., Султанова А.Н., Сычева Т.Ю. Особенности психоэмоционального состояния клиентов в период ожидания планового оперативного вмешательства // Медицина и образование в Сибири. 2022. № 6. С. 28–34.
4. Березанцев А.Ю. Психосоматика и соматоформные расстройства. М.: МЕДпресс-информ, 2021. 256 с.
5. Гаранян Н.Г. Депрессия и личность: обзор зарубежных исследований. Часть I // Социальная и клиническая психиатрия. 2021. Т. 31. № 1. С. 79–86.
6. Холмогорова А.Б. Интегративная психотерапия расстройств аффективного спектра. М.: Медпрактика-М, 2023. 480 с.
7. Hayes S.C., Strosahl K.D., Wilson K.G. Acceptance and Commitment Therapy: The Process and Practice of Mindful Change. 2nd ed. New York: Guilford Press, 2021. 402 p.
8. Kelson J.N., Lamkin M.S., Hayes S.C. A meta-analysis of the effectiveness of acceptance and commitment therapy for anxiety disorders // Journal of Contextual Behavioral Science. 2025. Vol. 35. P. 100–115. DOI: 10.1016/j.jcbs.2025.100115.
9. McCracken L.M. Acceptance and commitment therapy for chronic pain: a clinical update // British Journal of Pain. 2022. Vol. 16. № 2. P. 113–122. DOI: 10.1177/20494637211030218.
10. Hayes S.C., Hofmann S.G., Ciarrochi J. Creating a strategy for progress: A contextual behavioral science approach // Behavior Therapy. 2021. Vol. 52. № 3. P. 683–695. DOI: 10.1016/j.beth.2020.08.004.
11. Ковпак Д.В., Третьяк Л.Л. Терапия принятия и ответственности (ACT) при тревожных расстройствах: обзор исследований и клиническое применение //

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Консультативная психология и психотерапия. 2021. Т. 29. № 3. С. 115–138. DOI: 10.17759/cpp.2021290307.

12. Осин Е.Н., Рассказова Е.И., Леонтьев Д.А. [и др.]. Адаптация опросника «Принятие и действие – II» (AAQ-II) на русскоязычной выборке // Психологические исследования. 2021. Т. 14. № 77. С. 4. URL: https://psystudy.ru/index.php/num/2021v14n77/1882-osin77.html (дата обращения: 10.01.2026).

13. Arch J.J., Eifert G.H., Davies C. [et al.]. Randomized clinical trial of cognitive behavioral therapy versus acceptance and commitment therapy for mixed anxiety disorders // Journal of Consulting and Clinical Psychology. 2012. Vol. 80. № 5. P. 750–765. DOI: 10.1037/a0028310.

14. Wagener A.L., Van Diest K.A., Herbert J.D. Brief acceptance and commitment therapy for acute distress: a randomized trial // Journal of Contemporary Psychotherapy. 2016. Vol. 46. № 2. P. 103–112. DOI: 10.1007/s10879-015-9316-8.

15. Levin M.E., Herbert J.D., Piercy L.A. [et al.]. Examining the feasibility and effectiveness of a 1-hour ACT workshop for reducing preoperative anxiety in spine surgery patients // The Spine Journal. 2021. Vol. 21. № 4. P. 666–675. DOI: 10.1016/j.spinee.2020.11.006.

16. Craske M.G., Stein M.B., Eley T.C. [et al.]. Anxiety disorders // Nature Reviews Disease Primers. 2022. Vol. 8. № 1. Art. 24. DOI: 10.1038/s41572-022-00357-7.

17. Gloster A.T., Walder N., Levin M.E. [et al.]. The empirical status of acceptance and commitment therapy: A review of meta-analyses // Journal of Contextual Behavioral Science. 2022. Vol. 19. P. 181–192. DOI: 10.1016/j.jcbs.2021.12.004.

18. McCracken L.M., Vowles K.E. Acceptance and commitment therapy for chronic pain: a systematic review and meta-analyses // The Journal of Pain. 2014. Vol. 15. № 3. P. 221–235. DOI: 10.1016/j.jpain.2013.10.014.

19. Twohig M.P., Levin M.E. Acceptance and Commitment Therapy as a treatment for anxiety and depression: A review // Psychiatric Clinics of North America. 2017. Vol. 40. № 4. P. 751–770. DOI: 10.1016/j.psc.2017.08.007.

20. Bluett E.J., Homan K.J., Morrison K.L. [et al.]. Acceptance and commitment therapy for anxiety and OCD spectrum disorders: An empirical review // Journal of Anxiety Disorders. 2014. Vol. 28. № 6. P. 612–624. DOI: 10.1016/j.janxdis.2014.06.008.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

SCIENTIFIC METHODS AND TECHNOLOGIES

UDC 004.932.2

Bocharov N.A., Mildzikhov A.D. Development of a satellite image semantic segmentation model based on transformer neural networks

Разработка модели семантической сегментации спутниковых изображений на основе нейронных сетей типа «трансформеры»

Bocharov Nikita Alekseevich,
Associate Professor, Dr. Sci. (Tech.), RTU MIREA, Moscow
Mildzikhov Astemir Dzarakhmetovich,
Graduate Student, RTU MIREA, Moscow
Бочаров Никита Алексеевич,
доцент базовой кафедры № 234 – управляющих ЭВМ, РТУ МИРЭА, доцент, д.т.н., г. Москва
Мильдзихов Астемир Дзарахметович,
магистрант, РТУ МИРЭА, г. Москва

Abstract. *The article addresses the problem of automatic semantic segmentation of satellite images of natural areas for forest monitoring. Existing methods based on convolutional neural networks are insufficient due to loss of global context and sensitivity to noise. The authors propose an ensemble approach combining the SegFormer-B2 transformer architecture with original pre-processing algorithms (noise suppression, sharpening, green spectrum enhancement using ExG index, CLAHE and gamma correction) and post-processing (morphological closing, area filtering, hole filling). Experiments were conducted on a labeled dataset of 264 satellite images. The proposed method increases mean IoU from 0.71 to 0.75 (+5.6%) and Dice from 0.82 to 0.88 (+7.3%) compared to the baseline SegFormer-B2. The work has practical significance for environmental monitoring and cartography.*

Keywords: *semantic segmentation, satellite images, transformers, SegFormer, pre-processing, post-processing, forest monitoring.*

Аннотация. *В статье рассматривается задача автоматической семантической сегментации спутниковых изображений природных территорий для мониторинга лесных массивов. Существующие методы на основе свёрточных нейронных сетей недостаточно эффективны из-за потери глобального контекста и чувствительности к шумам. Авторами предложен ансамблевый подход, сочетающий трансформерную архитектуру SegFormer-B2 с оригинальными алгоритмами предобработки (подавление шумов, повышение резкости, усиление зелёного спектра с использованием индекса ExG, CLAHE и гамма-коррекции) и постобработки (морфологическое закрытие, фильтрация по площади, заполнение пустот). Эксперименты проведены на размеченном датасете из 264 спутниковых снимков. Показано, что предложенный метод повышает средний IoU с 0,71 до 0,75 (+5,6%) и Dice с 0,82 до 0,88 (+7,3%) по сравнению с базовым SegFormer-B2. Работа имеет практическую значимость для экологического мониторинга и картографии.*

Ключевые слова: *семантическая сегментация, спутниковые изображения, трансформеры, SegFormer, предобработка, постобработка, мониторинг лесов.*

Рецензент: Сагитов Рамиль Фаргатович - кандидат технических наук, доцент. Заместитель директора, главный научный сотрудник. ООО «Научно-исследовательский проектный институт «Промышленное и гражданское строительство»

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Введение

Современные системы дистанционного зондирования Земли обеспечивают регулярное получение спутниковых снимков высокого разрешения. Ручной анализ таких данных трудоёмок, а автоматические методы на основе классических алгоритмов (пороговая сегментация, кластеризация) и свёрточных нейронных сетей (U-Net, SegNet) не всегда справляются с шумами, вариативностью освещения и необходимостью учёта глобального контекста. Трансформерные архитектуры, благодаря механизму самовнимания, позволяют эффективно обрабатывать глобальные зависимости, что особенно важно для спутниковых снимков. Однако прямое применение трансформеров (например, ViT, Swin Transformer) требует больших вычислительных ресурсов и не учитывает специфику растительности. Цель данной работы – повышение точности семантической сегментации лесов на спутниковых изображениях путём разработки модели на основе трансформера.

Структура модели семантической сегментации

Исходя из проведенного анализа общая структура модели семантической сегментации выглядит следующим образом:

- входной интерфейс;
- модуль предварительной обработки;
- модуль семантической сегментации;
- модуль наложения маски на тайл (в полупрозрачном зеленом свете);
- модуль постобработки;
- модуль визуализации и сохранения результатов;
- управляющий модуль.

Структура представлена на рисунке 1.

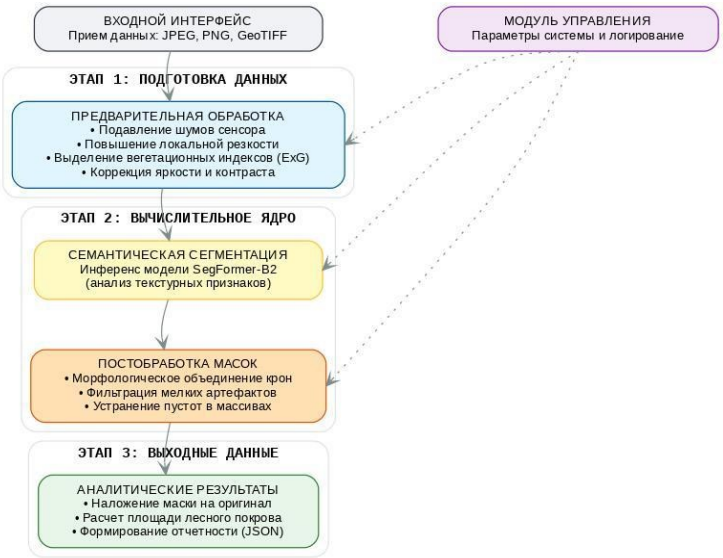


Рисунок 1 – Структура модели семантической сегментации

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Входной интерфейс принимает спутниковое изображение в форматах (JPEG, PNG) и передает изображение в модуль предобработки.

Модуль предварительной обработки выполняет начальную подготовку изображения для повышения качества последующей сегментации. Он состоит из трех последовательных этапов:

- подавление шумов;
- добавление резкости изображению;
- разбиение на подизображения (тайлы);
- переработка снимка в контрастный формат (акцент на зеленый спектр).

Выходной формат – трехканальный тензор [N, 3, 512, 512], где N – количество тайлов (подизображений), полученных при разбиении исходного спутникового снимка, 3 – три цветовых канала: красный (R), зеленый (G), синий (B), при этом зеленый канал предварительно усилен для лучшего выделения растительности, 512 и 512 – высота и ширина каждого тайла в пикселях. Все значения пикселей в тензоре приведены к диапазону [0, 1] с плавающей точкой (float32). Такое представление полностью совместимо с моделью SegFormer, которая ожидает на входе RGB-изображения в аналогичном нормализованном формате.

Модуль сегментации SegFormer создает маски сегментации для входящего изображения. На вход модуль получает тайлы после предобработки. Для каждого тайла нейросеть выполняет попиксельную классификацию, определяя, принадлежит ли пиксель лесу или фону. На выходе модуля формируется карта сегментации – двумерный массив размера H*W, каждый элемент которого содержит индекс класса.

Модуль наложения маски на тайл используется для визуального контроля качества работы системы на промежуточном этапе. Модуль накладывает полученную маску непосредственно на исходный тайл. Все пиксели, отнесенные к классу «лес», заливаются полупрозрачным зеленым цветом. Такое наложение позволяет оператору быстро оценить, правильно ли выделены кроны, нет ли пропусков или ложных срабатываний, еще до объединения тайлов в полное изображение.

Модуль постобработки результатов решает четыре основные задачи:

- морфологическую связку и устранение разрывов;
- склеивание тайлов с учетом геопривязки;
- геометрическую фильтрацию (исключает одиночные деревья и заполняет мелкие пустоты).

Выходом модуля является итоговое изображение, сохраненное в файл JPEG/PNG/GeoTIFF.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Методы предобработки и постобработки

Для повышения качества сегментации разработан многоэтапный алгоритм предобработки спутниковых RGB-снимков.

1) Подавление шумов. Спутниковые снимки неизбежно содержат шумовые компоненты, обусловленные физикой сенсора (темновой ток, дробовой шум фотоприемников) и влиянием атмосферы (рассеяние, поглощение, турбулентность). Такой шум проявляется в виде мелкозернистых вариаций яркости, не несущих полезной информации о структуре лесного покрова, и способен ухудшить работу сегментационной модели. Для его ослабления применяется нелокальное усреднение цветных изображений (Non-Local Means Denoising).

Для каждого пикселя изображения алгоритм ищет все похожие на него пиксели во всей области (или в ограниченной области поиска). Степень похожести определяется не по одному пикселю, а по целому квадратному фрагменту (патчу) вокруг него. Чем сильнее похож фрагмент одного пикселя на фрагмент другого, тем больший вес получит этот соседний пиксель при усреднении. Итоговое значение пикселя вычисляется как взвешенное среднее всех пикселей в области поиска, где веса пропорциональны сходству их окружений. Дополнительно все веса нормируются так, чтобы их сумма равнялась единице.

В данном ансамбле используется функция библиотеки OpenCV с параметром фильтрации, равным 10, и размером окна поиска 7 пикселей. Эти значения подобраны эмпирически для спутниковых снимков среднего разрешения. Такой набор обеспечивает эффективное сглаживание однородных участков (небо, открытая почва) и одновременно сохраняет резкие границы между лесом и остальными классами, не размывая кроны деревьев. Пример работы алгоритма показан на рисунке 2.

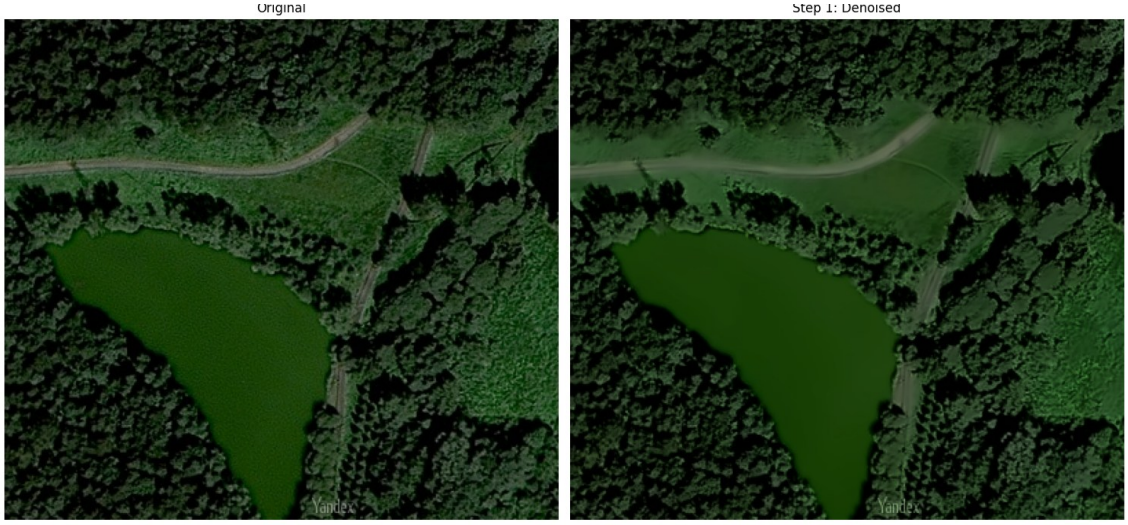


Рисунок 2 – Пример спутникового изображения после шумоподавления

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

2) Повышение резкости. После шумоподавления изображение может стать несколько размытым. Чтобы подчеркнуть контуры крон деревьев и мелкие детали, применяется метод нерезкого маскирования (Unsharp Masking).

Сначала создается размытая версия изображения с помощью гауссовского фильтра. Параметр размытия выбран равным 1.0, что гарантирует учет всех значимых соседей. Затем из исходного изображения вычитается размытое – так получается маска, содержащая только мелкие детали и контуры. Эта маска умножается на коэффициент силы резкости (в работе принят коэффициент 1.0) и прибавляется обратно к исходному изображению. В результате контуры становятся более выраженными, а общая структура изображения не нарушается.

После обработки снимка с помощью алгоритма контуры крон деревьев становятся более четкими, что помогает нейросети точнее определять границы леса. Операция выполняется в цветовом пространстве RGB отдельно для каждого канала. Пример работы алгоритма показан на рисунке 3.

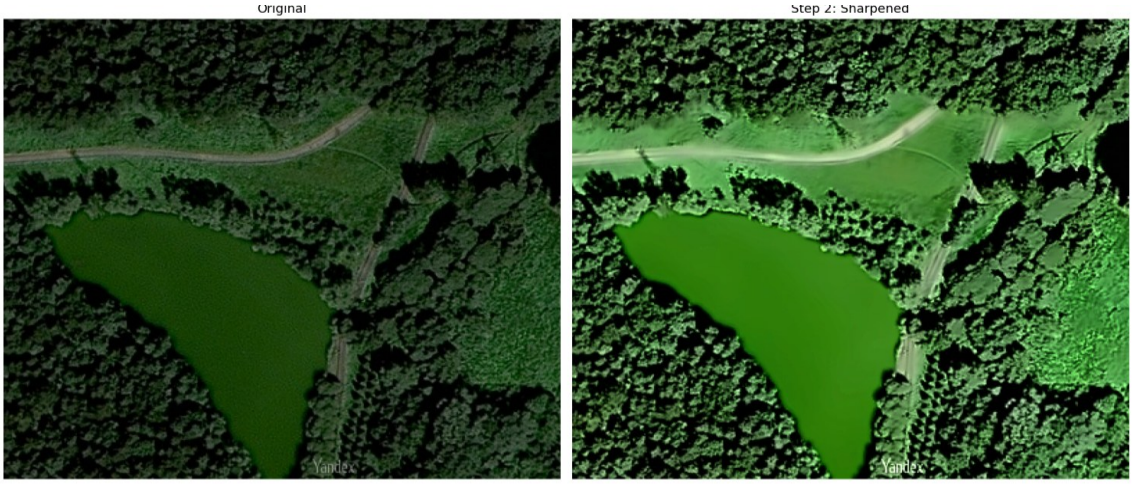


Рисунок 3 – Пример спутникового изображения после повышения резкости

3) Разбиение на тайлы. Спутниковые снимки имеют высокое разрешение (размером около 10000x10000 пикселей). Нейросеть SegFormer, как и большинство других трансформеров, имеет ограничение на размер входного изображения 512x512 пикселей, поэтому исходный снимок нарезается на перекрывающиеся фрагменты – тайлы.

Перекрытие между соседними тайлами: 256 пикселей, то есть ровно половина размера тайла. Перекрытие необходимо, чтобы устранить артефакты на стыках, так как края тайлов обрабатываются нейросетью менее достоверно, чем центр. Каждый тайл получает координатную метку – положение его верхнего левого угла в исходном изображении. Пример разбиения показан на рисунке 4.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

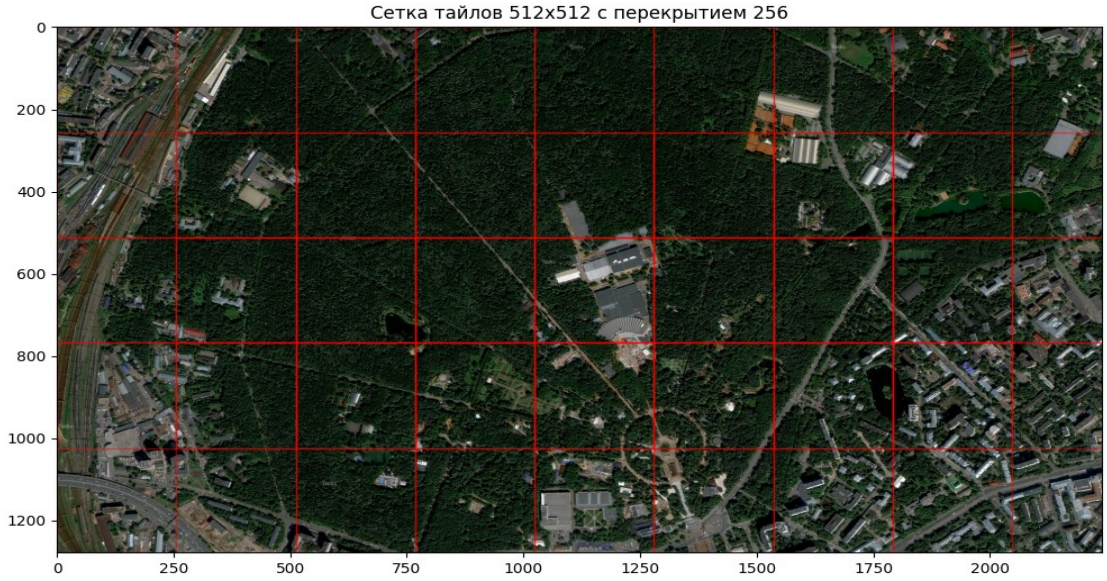


Рисунок 4 – Пример схемы разбиения спутникового снимка на тайлы с перекрытием

4) Перевод в контрастный формат с акцентом на зеленый спектр. Растительность наиболее информативно проявляется в зеленом канале спектра. Для усиления различий между лесом и фоном (почва, вода, тени) используется комбинация спектральных индексов и методов адаптивного повышения контраста. Перевод в контрастный формат происходит по трем этапа:

- вычисление индекса избыточной зелени (ExG);
- процентное линейное растяжение;
- адаптивная эквализация гистограммы с ограничением контраста (CLAHE);
- гамма-коррекция.

На первом этапе для каждого пикселя берутся нормализованные значения красного, зеленого и синего каналов (каждое в диапазоне от 0 до 1). Индекс ExG вычисляется по формуле:

$$ExG = 2 * G - R - B \quad (1)$$

где R, G, и B – зеленый, красный и синий. Здоровые растения сильно отражают в зеленом диапазоне и поглощают в красном и синем, поэтому удвоение зеленого усиливает эту разницу. Полученное значение затем сдвигается и масштабируется, чтобы попасть в стандартный диапазон яркости от 0 до 255 (пиксельные значения).

На втором этапе анализируется гистограмма яркости ExG-изображения. Определяются 2% и 98%, то есть, такие уровни яркости, ниже которых лежат 2% самых темных пикселей и выше которых – 2% самых светлых. Все пиксели, которые темнее 2%, приравниваются к нулю. Все пиксели, ярче 98%, приравниваются к 255. Остальные

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

значения линейно растягиваются между этими границами. Это повышает общий контраст изображения, не теряя детали в тенях и свете.

На третьем этапе изображение разбивается на небольшие квадратные области (обычно 8 на 8 пикселей). Для каждой области строится своя гистограмма яркости и выполняется выравнивание, чтобы улучшить локальный контраст. Чтобы при этом не усилить шум, вводится ограничение на максимальный наклон гистограммы (clipLimit = 2.5). Затем между соседними областями выполняется интерполяция, чтобы избежать видимых границ между блоками. В результате лесные участки становятся более однородными, а фон – более темным.

На четвертом этапе значения пикселей преобразуются по степенному закону: каждый пиксель делится на 255 (чтобы получить долю от максимума), затем возводится в степень гамма, и результат снова умножается на 255. В работе используется гамма = 0.5. Значение гамма меньше единицы осветляет темные участки изображения и затемняет яркие. Поскольку лесные массивы на ExG-изображении обычно темнее фона, гамма-коррекция делает их ярче и увеличивает контраст между лесом и окружением. Выходное изображение после всех преобразований представлено на рисунке 5.

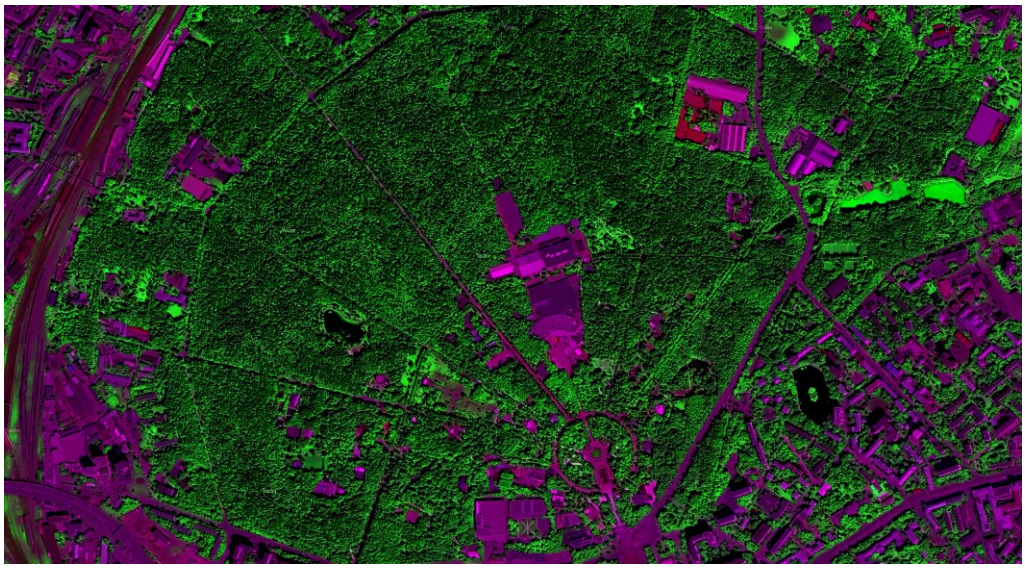


Рисунок 5 – Пример преобразований для усиления зеленого спектра

Выходом модуля предобработки является трехканальный набор данных размерностью N на 3 на 512 на 512, где N – количество тайлов. Все значения пикселей приведены к диапазону от 0 до 1 и представлены числами с плавающей точкой. Такой формат полностью совместим со входными требованиями модели SegFormer.

После того, как модель SegFormer сформировала бинарные маски сегментации для каждого тайла (0 – фон, 1 – лес), выполняется комплексная постобработка,

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

включающая четыре основных этапа: склейку тайлов, морфологическую связку и устранение разрывов, геометрическую фильтрацию по площади и аналитический расчет с визуальным совмещением.

1) Бинарная маска, полученная после обработки нейросетью, может содержать разрозненные группы пикселей, микро-пустоты внутри лесных массивов и “рваные” края крон. Это связано с тем, что нейросеть иногда неуверенно классифицирует отдельные пиксели внутри густого леса или на границах. Для устранения этих артефактов применяется операция морфологического закрытия (closing).

Морфологическое закрытие представляет собой последовательное применение двух базовых операций: сначала расширения, затем эрозии. Расширение добавляет пиксели к границам объектов, заполняя мелкие разрывы и соединяя близко расположенные фрагменты. Эрозия, выполняемая следом, удаляет излишне добавленные пиксели, восстанавливая исходные размеры объектов, но при этом разрывы остаются заполненными. В совокупности эти две операции сглаживают контуры и устраняют мелкие полости.

Для выполнения операций используется структурный элемент (ядро) – небольшая матрица, определяющая форму и размер области, которая анализируется вокруг каждого пикселя. В работе применяется эллиптическое ядро размером 30x30 пикселей. Эллиптическая форма выбрана потому, что она лучше соответствует естественной форме крон деревьев по сравнению с прямоугольным ядром. Размер ядра (30 пикселей) эмпирически подобран для спутниковых снимков с разрешением 10 м/пиксель: он соответствует 300 метрам на местности и позволяет объединять деревья, находящиеся на типичном расстоянии друг от друга.

После морфологического закрытия края лесных массивов становятся гладкими, мелкие разрывы внутри леса исчезают, а близко стоящие деревья объединяются в единую семантическую структуру, соответствующую реальному лесному покрову.

2) Отдельные маски тайлов необходимо объединить в единую карту, соответствующую исходному спутниковому снимку. На этапе предобработки каждый тайл был снабжен координатами своего верхнего левого угла в исходном изображении.

Создается пустая матрица размером, равным высоте и ширине исходного снимка, изначально заполненная нулями. Для каждого тайла его бинарная маска вставляется в эту общую матрицу по соответствующим координатам. В областях, где тайлы перекрывались, один и тот же пиксель получает несколько значений от разных тайлов. Для разрешения этого конфликта применяется правило максимума: итоговое значение пикселя выбирается как наибольшее среди всех перекрывающихся предсказаний.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Используя сохраненные координаты углов, бинарные маски собираются в единое изображение, соответствующее исходному снимку. В областях перекрытия (50%) значение пикселя выбирается как максимум среди перекрывающихся тайлов – это позволяет сохранить все обнаруженные деревья даже на границах фрагментов.

3) Геометрическая фильтрация по площади. На этом этапе выполняется очистка маски от шумовых объектов и уточнение геометрии лесных массивов. Фильтрация основана на анализе связных компонент (connected components) – групп пикселей, которые соприкасаются друг с другом по сторонам или углам.

Алгоритм выделяет все связные компоненты (отдельные «островки» леса) и для каждой компоненты вычисляет ее площадь в пикселях. Если площадь компоненты составляет менее 15x15 пикселей, то такая компонента считается шумовой и удаляется – все ее пиксели заменяются на фоновое значение 0. Порог 225 квадратных метров выбран потому, что одиночные деревья или мелкие артефакты классификации обычно имеют меньшую площадь, а реальные лесные массивы – большую.

Лесной массив может содержать внутренние пропуски – “дыры”, где алгоритм не распознал лес, хотя на самом деле он там есть (например, из-за теней или неоднородности крон). Для заполнения таких пустот алгоритм анализирует инвертированную маску, то есть, маску, где лес и фон поменяны местами. В инвертированной маске “дырами” становятся связные компоненты фона, полностью окруженные лесом. Для каждой такой внутренней пустоты вычисляется ее площадь. Если площадь пустоты составляет менее 16 квадратных метров, она автоматически закрашивается как лес. Порог 16 квадратных метров соответствует площади 4x4 пикселя и позволяет заполнять микро-пропуски, не затрагивая реальные прогалины или дороги. Результат этапа показан на рисунке 6.

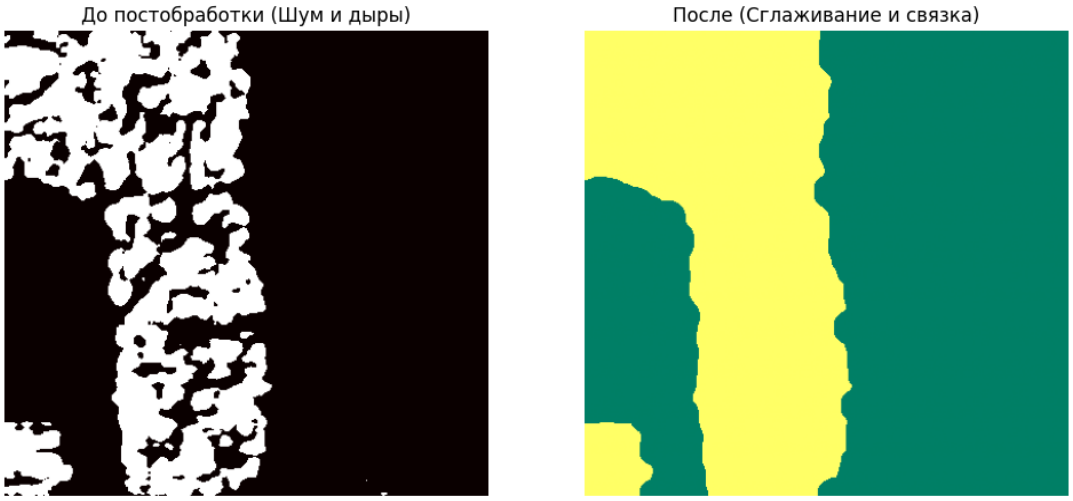


Рисунок 6 – Пример преобразований маски с помощью геометрической фильтрации

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

На улучшенное изображение накладывается полупрозрачная заливка в соответствии с таблицей цветов (Таблица 1).

Таблица 1

Таблица цветов

Класс	Цвет (RGB)
Лес (forest)	(0, 255, 0) – зеленый
Фон (background)	Без заливки

Эксперименты

Использован датасет из 264 спутниковых RGB-снимков разрешением 512×512 пикселей (184 – обучение, 40 – валидация, 40 – тестирование). Разметка вручную скорректирована в CVAT. Сравнивались три архитектуры: SegNet, U-Net (ResNet34) и SegFormer-B2. Каждая модель тестировалась в двух вариантах: “как есть” и в составе разработанной моделью. Обучение проводилось 15 эпох, batch size = 4. Использована метрика IoU (Intersection over Union) и Dice.

Результаты

В таблице 2 приведены средние значения метрик на тестовой выборке (40 снимков).

Таблица 2

Сравнительная таблица моделей

Модель	Средний IoU	Средний Dice	Валидационный loss
SegNet	0.68	0.80	0.42
Разработанный ансамбль на основе SegNet	0.70	0.81	0.40
U-Net (ResNet34)	0.66	0.79	0.41
Разработанный ансамбль на основе U-Net	0.67	0.80	0.42
SegFormer-B2 (без предобработки)	0.71	0.82	0.25
Разработанный ансамбль на основе SegFormer-B2	0,75	0,88	0,23

Предложенный ансамбль на основе SegFormer-B2 превосходит все остальные конфигурации. Прирост IoU составил +5,6% по сравнению с базовым трансформером, а для свёрточных сетей прирост оказался значительно ниже (до +2,9%). Это подтверждает эффективность разработанных алгоритмов именно в сочетании с трансформерной архитектурой.

Заключение

В работе разработан и программно реализован ансамблевый метод семантической сегментации спутниковых изображений на основе трансформера SegFormer с оригинальными этапами предобработки и постобработки. Экспериментально доказано повышение точности выделения лесных массивов.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Разработанное программное обеспечение имеет графический интерфейс (Tkinter) и может быть использовано для мониторинга вырубок и восстановления лесов. Направления дальнейших исследований – адаптация метода для мультиспектральных снимков и интеграция с геоинформационными системами.

References

1. BENAYAD M., et al. Using Deep Learning to create an Enhanced Basemap from RGB Satellite Images for Urban Planning // Natural Hazards Research. 2025. DOI: 10.1016/j.nhres.2025.08.003.
2. HIDAYATULLAH P., et al. YOLOv8 to YOLO11: A Comprehensive Architecture In-depth Comparative Review // arXiv:2501.13400. 2025.
3. KHANAM R., HUSSAIN M. YOLOv11: An Overview of the Key Architectural Enhancements // arXiv:2410.17725. 2024.
4. LIU Z., et al. Swin Transformer: Hierarchical Vision Transformer using Shifted Windows // arXiv:2103.14030. 2021.
5. Qi Y., Lou M., Liu Y., Li L., Yang Z., Nie W. Advancing image super-resolution techniques in remote sensing: a comprehensive survey // arXiv:2505.23248. 2025.
6. Haqaji M. M. E., Arifin A. S., Satyawan A. S. Enhancing Object Detection for Autonomous Vehicles in Low-Resolution Environments Using a Super-Resolution Transformer-Based Preprocessing Framework // World Electric Vehicle Journal. 2025. Vol. 16, no. 12. Art. 678. DOI: 10.3390/wevj16120678.
7. Саечников И. В., Скакун В. В., Чернявская Э. А. Особенности разработки и применения ансамблевых методов глубокого обучения для распознавания и анализа объектов на спутниковых снимках // RusNanoSat-2025. Самара, 2025. С. 158–161.
8. Каунов С. А. Исследование возможностей моделей-трансформеров в задачах лабораторного практикума курса «Компьютерное зрение» : магистерская диссертация. Екатеринбург, 2025.
9. Бережнов Н. И., Сирота А. А. Совершенствование механизмов внимания для архитектуры трансформер в задачах повышения качества изображений // Компьютерная оптика. 2024. Т. 48, № 5. С. 726–733. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1393.
10. Xie E., Wang W., Yu Z. et al. SegFormer: Simple and Efficient Design for Semantic Segmentation with Transformers // arXiv:2105.15203. 2021.
11. Dosovitskiy A., et al. An Image is Worth 16x16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale // ICLR 2021.
12. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation // MICCAI 2015.
13. Chen L.C., et al. DeepLab: Semantic Image Segmentation with Deep Convolutional Nets, Atrous Convolution, and Fully Connected CRFs // IEEE TPAMI. 2018. Vol. 40, no. 4. P. 834–848.
14. Wang W., et al. Pyramid Vision Transformer: A Versatile Backbone for Dense Prediction without Convolutions // ICCV 2021.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 004.75

Aluev A. Observability of high-load SaaS platforms: tracing, metrics, and logging for reducing incident resolution time

Aluev Andrei
Master's Degree,
Ural Federal University

Abstract. *The article examines observability in high-load SaaS platforms as an integrated framework of monitoring, diagnosis, and post-incident analysis. It is shown that in distributed digital environments, traditional monitoring does not provide sufficient depth for the rapid localization of the causes of degradation and failure. The diagnostic potential of metrics, distributed tracing, and structured logs at different stages of incident investigation is analyzed. Approaches to the architectural organization of platform observability are considered, including telemetry data standardization, signal alignment, data sampling, and label cardinality control. The article also examines practices of alerting configuration, dashboard organization, and post-incident analysis. It is concluded that observability serves as a key mechanism for reducing MTTR and lowering the recurrence of failures in high-load SaaS systems.*

Keywords: *observability, SaaS platforms, distributed tracing, application metrics, structured logs, MTTR, incident management*

Рецензент: Сагитов Рамиль Фаргатович - кандидат технических наук, доцент. Заместитель директора, главный научный сотрудник. ООО «Научно-исследовательский проектный институт «Промышленное и гражданское строительство»

1. Introduction.

As digital services become more distributed and the architecture of high-load SaaS platforms grows more complex, operational resilience increasingly depends on the quality of system observability. Traditional monitoring approaches, focused mainly on infrastructure indicators and isolated control of individual components, are no longer sufficient for timely detection of performance degradation, cascading failures, and hidden interservice anomalies. In microservice-based and event-driven environments, an incident rarely remains confined to a single node or application; it often emerges at the intersection of network interactions, message queues, dependent APIs, caching mechanisms, and internal business operations. For this reason, observability is increasingly viewed not as an auxiliary monitoring tool, but as an integrated framework for collecting, correlating, and interpreting operational data in order to accelerate diagnosis and improve platform manageability.

Within this framework, distributed tracing, application metrics, and structured logs are of particular importance, since together they make it possible to reconstruct the actual path of a request, detect abnormal service behavior, and reduce root-cause localization time. On

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

the other hand, the operational efficiency of the observability methodology does not depend solely on the presence of telemetry but also on the level of its architectural structuring, correlation of signals, and readiness of response processes, such as alerting, dashboarding, runbooks, and post-incident reviews. The objective of the paper is to analyze the observability of highly loaded SaaS systems as an integrated approach to monitoring, diagnostics, and post-incident analysis, and to determine methods that can contribute to faster incident resolution and decrease the likelihood of recurrence.

2. Incidents in high-load SaaS platforms: architectural complexity and the limits of traditional monitoring

In the operation of high-load SaaS platforms, an incident should be understood not as an isolated failure of a single component, but as a disruption of the system's normal state that leads to degradation in availability, performance, or the correctness of user-facing and internal business operations [1]. In a distributed architecture, such a disruption usually emerges not at the level of one isolated element, but as a result of lost consistency across multiple services, message queues, API interactions, caching layers, and external dependencies.

Recent industry data confirm that incidents in modern distributed environments are not exceptional events, but a regular part of operational practice. According to the 2025 SRE Report, 40% of organizations reported experiencing between 1 and 5 incidents during the 30 days preceding the survey (fig. 1).

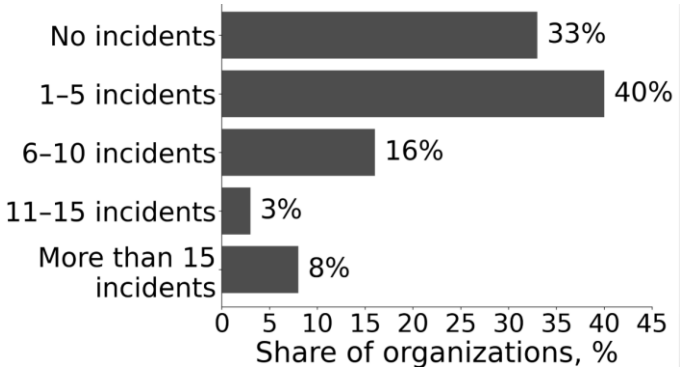


Figure 1. Distribution of organizations by the number of incidents recorded during the 30 days preceding the survey, according to the 2025 SRE Report [2]

Under these conditions, the concept of an incident extends beyond complete service outage. Partial system degradation, increased latency, a higher error rate in specific user scenarios, and disruptions in the consistency of business operations also acquire substantial operational significance. In distributed SaaS platforms, such forms of disruption are often the most typical, as they can materially reduce the actual quality of service even when formal availability is preserved. For example, similar relationships have been noted in studies of Linux-

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

based high-load service environments, where operational stability is directly linked to the efficiency of low-level resource management, including memory behavior under sustained load [3].

Traditional monitoring is insufficient primarily because it is **historically focused on aggregated infrastructure indicators and predefined failure scenarios**. By contrast, observability is intended to support questioning the system without full prior knowledge of its internal state and to reveal previously unknown failure patterns. This requires applications to generate traces, metrics, and logs that are sufficient for diagnosing not only common but also previously unknown problems. In this context, distributed tracing becomes particularly important, as it makes it possible to follow a request across a complex distributed system and analyze issues that cannot be reproduced locally.

The limitations of traditional monitoring are further intensified by tool **fragmentation and the high number of context switches during incident investigation**. According to Grafana, by 2025 organizations used an average of eight observability tools, whereas survey participants reported 101 observability tools; meanwhile, the number of data sources within Grafana was 16 on average and rose to 24 in firms with more than 5,000 workers. In such an environment, operators often see not a coherent cause-and-effect chain, but fragmented signals: latency spikes in one tool, rising error rates in another, and indirect symptoms in a third. As a result, root-cause localization becomes slower, while dashboard-based monitoring increasingly substitutes diagnosis with a set of disconnected views.

Finally, another fundamental limitation of traditional monitoring is its **weak suitability for managing recovery and resilience after production changes**. Modern DORA metrics assess stability not through abstract uptime, but through failed deployment recovery time, change fail rate, and deployment rework rate, that is, through the system’s ability to recover quickly from unsuccessful changes and minimize unplanned corrective work. This is especially important for SaaS platforms, where many incidents are caused not by hardware failures, but by releases, configuration changes, and shifts in service behavior. In this context, reactive alerting without trace context, structured logs, and service-oriented metrics leads to alert fatigue. According to Splunk, in 2025, 43% of specialists reported spending too much time responding to alerts (fig. 2).

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

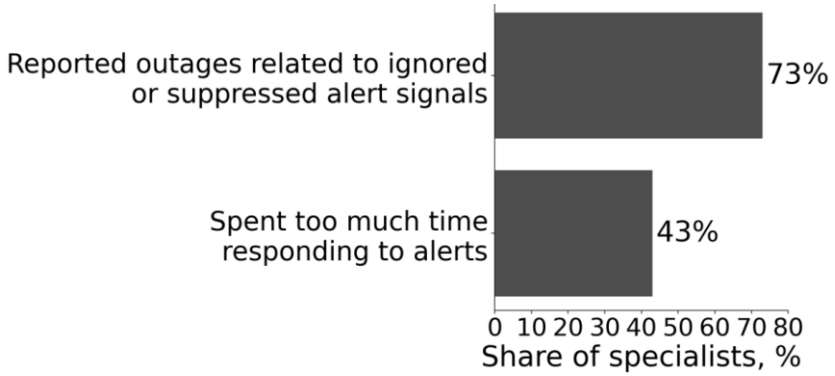


Figure 2. Selected indicators of alert fatigue and its operational consequences, according to Splunk, 2025 [4]

These data indicate that, for high-load SaaS platforms, the key objective is to move beyond isolated state monitoring toward observability as an integrated framework that connects telemetry signals, architectural context, and incident response procedures.

Thus, the growing architectural complexity of high-load SaaS platforms shifts the focus from conventional monitoring of isolated states to the analytical use of correlated telemetry. In this context, distributed tracing, metrics, and structured logs should be examined as complementary sources of diagnostic evidence, each contributing differently to incident detection, scoping, and root-cause investigation.

3. Diagnostic potential of distributed tracing, metrics, and logging

Modern observability platforms assume that sufficient visibility is achieved not through a single type of telemetry, but through the combined use of metrics, logs, and distributed traces, since each of these signals captures a different aspect of system behavior and provides distinct diagnostic value. In incident investigation, they do not substitute for one another, but form a complementary analytical framework: metrics help detect abnormal behavior, tracing helps localize the affected part of the system, and logs help confirm and interpret the specific cause of failure (table 1).

Table 1

Diagnostic roles of metrics, traces, and logs in incident investigation [5, 6]

Signal type	Primary diagnostic role	Most useful stage of investigation	Typical analytical value
Metrics	Detection of abnormal system behavior.	Detection, initial scoping.	Reveal latency growth, error rate increase, throughput drop, saturation, queue buildup.
Distributed traces	Reconstruction of request path across services.	Root-cause localization, dependency analysis.	Identify bottlenecks, critical path segments, latency propagation, interservice failures.
Structured logs	Verification and interpretation of specific failure events.	Root-cause confirmation, remediation.	Show exceptions, error codes, timeout events, rejected operations, retry outcomes.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Taken together, these telemetry signals make it possible to move from isolated symptom detection to a more structured reconstruction of the incident mechanism. In high-load SaaS environments, where failures often propagate across multiple services and technical layers, the diagnostic value of observability lies not in any single signal, but in their coordinated use within a unified operational context. This makes incident investigation more consistent, reduces dependence on manual hypothesis checking, and improves the accuracy of root-cause identification, especially in cases of short-lived, intermittent, and difficult-to-reproduce failures.

Accordingly, the practical diagnostic value of observability depends not only on the presence of heterogeneous telemetry signals, but also on the architectural conditions under which they are collected, correlated, and interpreted within a unified analytical framework.

4. Designing observability platforms: telemetry collection, signal correlation, and data standardization

An observability platform in a high-load SaaS environment should be treated not as a collection of separate tools, but as an architecturally organized telemetry framework suitable for real-time diagnosis and post-incident analysis. Its effectiveness depends not only on the presence of traces, metrics, and logs, but also on consistent data standardization, signal collection and routing, sampling and cardinality control, and correlation of telemetry streams within a unified operational context. For this reason, observability should be designed as a multi-layered system in which each architectural stage affects diagnostic completeness, investigation reproducibility, scalability, and operational cost (table 2).

Table 2

Architectural stages of observability platform design in high-load SaaS environments [7, 8]

Architectural stage	Core objective	Main implementation focus	Operational significance
Data standardization	Ensure semantic consistency of telemetry.	Unified attributes, naming rules, semantic conventions.	Enables consistent interpretation and correlation of signals.
Signal collection and routing	Organize controlled telemetry ingestion and delivery.	Collectors, pipelines, filtering, enrichment, export logic.	Reduces fragmentation and supports stable telemetry flow.
Sampling and cardinality control	Balance diagnostic depth and resource cost.	Head/tail sampling, label control, aggregation policies.	Preserves useful signals while limiting storage and processing overhead.
Signal correlation in operational context	Make telemetry actionable for diagnosis and investigation.	TraceId, SpanId, resource attributes, service and environment context.	Supports root-cause analysis, reproducibility of investigation, and MTTR reduction.

The presented architectural logic shows that observability in a high-load SaaS environment cannot be reduced to the simple accumulation of telemetry data. The diagnostic value of signals depends on how consistently they are embedded in a unified system of

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

naming, routing, selection, and correlation. Without such consistency, even large volumes of traces, metrics, and logs do not produce a coherent view of an incident, but instead increase the amount of fragmented technical information requiring manual interpretation. Therefore, the architectural maturity of an observability platform is expressed primarily in its ability to ensure signal comparability and continuity of context from event occurrence to incident analysis.

It is equally important that each of these stages affects not only diagnostic completeness, but also the operational sustainability of the observability platform itself. Insufficient standardization hinders data correlation, uncontrolled collection increases noise and cost, and the lack of a well-designed linkage between signals reduces the reproducibility of incident investigation. As a result, an observability platform should be designed as a dual-purpose engineering system: on the one hand, it provides the technical foundation for failure detection and analysis; on the other hand, it creates the organizational conditions for MTTR reduction, scalable telemetry use, and greater reliability of the operational environment as a whole. In this sense, the architectural quality of observability directly determines whether telemetry remains a passive data stream or becomes an effective basis for incident investigation and operational response.

5. Operational practices for MTTR reduction: alerting, dashboards, runbooks, and post-incident analysis

Reducing incident resolution time in practice requires observability data to be transformed into a managed operational workflow rather than merely collected. In high-load SaaS platforms, this function is performed through the combination of alerting, dashboards, runbooks, and post-incident analysis, since the availability of traces, metrics, and logs alone does not guarantee rapid recovery. This approach is particularly important in SaaS environments, where a substantial share of failures is caused not by hardware faults, but by releases, configuration changes, and integration errors.

At the first level of the operational framework, the **quality of alerting** plays a decisive role. An excessive number of signals, weak prioritization, and low detection accuracy produce alert fatigue, in which notifications cease to accelerate response and instead compete for engineers' attention. This means that alerting architecture should be built not around maximizing the number of notifications, but around identifying genuinely action-worthy events associated with user impact, the risk of SLO violation, and confirmed anomalies in service metrics.

The practical significance of a centralized observability framework is also supported by operational benchmarks. The **Grafana Observability Survey 2025** cites the example of a large technology company where observability centralization reduced MTTR by 40% and saved an average of 15 engineering hours per incident. For a high-load SaaS platform, this is particularly important, since the value of observability depends not only on the completeness of signals,

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

but also on the speed of transition from an alert to a coherent diagnostic context in which the team can quickly assess the blast radius, affected services, and the likely mechanism of degradation.

Dashboards in this framework serve not a presentational but a navigational and diagnostic function. Their role is to move the team quickly from the fact of degradation to a structured view of the incident, including latency, error rate, saturation, queues, affected services, and user scenarios. The technical value of this configuration is also reflected in typical operational thresholds: for example**, New Relic documentation** describes an alerting condition in which an incident is triggered when total application response time exceeds 5 seconds for 5 minutes [9]. This shows that, in mature observability practice, a dashboard should do more than display metrics; it should enable a rapid transition from a threshold breach to the context of the service, the release, and the user impact. For this reason, effective dashboarding in SaaS platforms should be hierarchical, moving from high-level user-impact and SLO indicators to service-level and detailed operational views linked to trace and log context. Only in such a configuration does a dashboard become a triage tool rather than a passive metric display.

Finally, sustained MTTR reduction is impossible without **post-incident analysis**, which turns an isolated failure into a source of systemic improvement. Such review should capture not only the immediate technical cause, but also the chain of conditions that allowed the incident to occur, including insufficient alerting, missing dashboard views, logging gaps, incomplete traces, outdated runbooks, or unclear ownership across teams. In this sense, observability becomes a tool not only for detection, but also for organizational learning. The economic significance of this approach is also confirmed by industry benchmarks (table 3).

Table 3

Economic effect of mature observability practices according to the New Relic Observability Forecast 2025 [10]

Indicator	Organizations with mature full-stack observability	Other organizations	Analytical significance
Average cost of a high-impact outage, USD/hour	1,000,000	2,000,000	Mature observability practices are associated with an approximately twofold reduction in direct losses from major incidents.
Relative scale of outage-related losses	0.5×	1.0×	Confirms that observability affects not only diagnosis, but also the economics of recovery.

Taken together, these benchmarks show that mature observability practices influence not only the speed of incident investigation, but also the economic consequences of service disruption. For high-load SaaS platforms, this means that alerting, dashboards, runbooks, and

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

post-incident analysis should be treated as parts of a single operational cycle linking detection, diagnosis, response, and learning. Only under this condition does observability become not merely a monitoring capability, but a mechanism for reducing MTTR, limiting outage-related losses, and improving the resilience of the production environment.

6. Conclusion

Observability in high-load SaaS platforms should be understood as an integrated framework of operational control that combines telemetry collection, diagnosis, incident response, and post-incident analysis. The analysis shows that in distributed digital environments, traditional monitoring, focused mainly on aggregated infrastructure indicators, does not provide sufficient depth for rapid localization of the causes of degradation and failure. Diagnostic effectiveness is achieved through the coordinated use of metrics, distributed tracing, and structured logs, which make it possible to move from symptom detection to reconstruction of the incident mechanism and identification of its root cause. At the same time, the practical value of observability depends not only on the availability of signals, but also on the quality of telemetry architecture, including data standardization, context correlation, controlled collection, and the suitability of signals for reproducible incident investigation.

It is equally important that observability in high-load SaaS systems performs not only a diagnostic, but also an operational and organizational function. Effective alerting, hierarchically structured dashboards, up-to-date runbooks, and formalized post-incident review together form a unified operational workflow that supports MTTR reduction, lowers the recurrence of failures, and limits the direct losses caused by service disruption. Therefore, a mature observability platform should be designed and used as a mechanism of engineering resilience in which technical observability capabilities are combined with response procedures and organizational learning. Such an approach makes it possible to treat observability not as a collection of monitoring tools, but as a systemic foundation for the reliability, scalability, and manageability of modern SaaS platforms.

References

1. Akpomedaye B, Wimmer H, 2025. Automated Incident Response Systems: Enhancing Efficiency and Accuracy in the Clouds. International IOT, Electronics and Mechatronics Conference, Singapore, Springer Nature Singapore, pp 149-167.

2. Catchpoint, 2025. The SRE Report 2025: Highlighting Critical Trends in Site Reliability Engineering. https://www.catchpoint.com/press-releases/the-sre-report-2025-highlighting-critical-trends-in-site-reliability-engineering. Accessed 10 April 2026

3. Otkidach I, 2026. Operational optimization of memory management in Linux-based high-load service environments. Cold Science 26: 28-39.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

4. Splunk, 2025. Get the latest research: State of Observability 2025. https://www.splunk.com/en_us/form/state-of-observability.html. Accessed 10 April 2026

5. Esan O, 2024. Enhancing SaaS reliability: real-time anomaly detection systems for preventing operational downtime. International Journal of Engineering Technology Research & Management 8(12): 466-485.

6. Damarched MK, 2026. Harnessing Large Language Models and Agentic AI for Transformative Cloud Reliability and Incident Management: A Comprehensive Suggestive Review. Journal of Computer Science and Technology Studies 8(5): 43-81.

7. Sakinala K, 2025. Monitoring and observability for cloud-native applications. Journal of Computer Science and Technology Studies 7(8): 101-115.

8. Kotsakis G, Papaioannou C, Souflas T, Tsolkas D, Kakyris A, Gounas P, Stavropoulos P, 2025. Development and implementation of an architecture for cloud-based monitoring in machining, focusing on high performance applications. Procedia CIRP 133: 579-584. doi: 10.1016/j.procir.2025.02.099

9. New Relic, 2026. Getting started with New Relic and Terraform. https://docs.newrelic.com/docs/infrastructure-as-code/terraform/terraform-intro/. Accessed 12 April 2026

10. New Relic, 2025. 2025 Observability Report (Observability Forecast 2025). https://newrelic.com/resources/report/observability-forecast/2025. Accessed 13 April 2026

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 621.865.8

Antipin M.E., Kimstach E. Development of a unified network environment for managing robot collaborators in the processes of labeling and product codes

Разработка единой сетевой среды для управления роботами-коллаборантами в процессах нанесения этикеток и кодов на продукцию

Antipin Mikhail Evgenievich,
Associate Professor of the Department of Innovation Management, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk
Kimstach Ekaterina,
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk
Антипин Михаил Евгеньевич,
доцент кафедры управления инновациями, канд. физ.-мат. наук, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск
Кимстач Екатерина,
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск

Abstract. *This paper focuses on the development of an automated system for marking and applying DataMatrix codes using two operational robots. A control system architecture is proposed in which all devices are coordinated through a central server and a unified information space. Rules for exchanging data between the system components are developed, ensuring the smooth execution of process steps, the transfer of production information, and monitoring of the equipment's operating status. The system was implemented on a test bench using Promobot M Edu robots. Tests confirmed the operability of the proposed system and its potential for ensuring quality in a production environment.*

Keywords: *collaborative robots, DataMatrix marking, industrial automation, unified information space, robotic system, digital transformation of production.*

Аннотация. *Данная работа посвящена созданию автоматизированной системы для операций маркировки и нанесения кодов DataMatrix с использованием двух совместно действующих роботов. Предложена архитектура системы управления, где координация всех устройств осуществляется через центральный сервер и единое информационное пространство. Разработаны правила обмена данными между компонентами установки, гарантирующие слаженное выполнение производственных этапов, передачу информации о производстве и мониторинг рабочего состояния оборудования. Система была реализована на тестовом стенде с применением роботов Promobot M Edu. Проведенные тесты подтвердили функциональность предложенной структуры и ее потенциал для внедрения в производственные условия.*

Ключевые слова: *коллаборативные роботы, DataMatrix-маркировка, автоматизация производства, единое информационное поле, роботизированный комплекс, цифровая трансформация промышленности.*

Рецензент: Сагитов Рамиль Фаргатович - кандидат технических наук, доцент. Заместитель директора, главный научный сотрудник. ООО «Научно-исследовательский проектный институт «Промышленное и гражданское строительство»

Введение. Развитие современных промышленных предприятий тесно связано с процессами цифровой трансформации производства. Повышение требований к качеству выпускаемой продукции, необходимость снижения себестоимости и рост уровня автоматизации приводят к активному внедрению робототехнических комплексов, интеллектуальных систем управления и технологий обмена данными. Значительную роль в этом процессе играет концепция Индустрии 4.0, ориентированная

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

на интеграцию оборудования, программного обеспечения и корпоративных информационных ресурсов в единую цифровую среду [1].

Одним из направлений цифровизации промышленности является организация систем идентификации и прослеживаемости продукции. В настоящее время на многих предприятиях обязательным элементом производственного цикла становится нанесение кодов DataMatrix, позволяющих обеспечить контроль движения товара от момента изготовления до реализации конечному потребителю. Использование цифровой маркировки способствует борьбе с контрафактной продукцией, повышает прозрачность логистических процессов и обеспечивает соответствие требованиям действующего законодательства.

Несмотря на широкое распространение автоматизированного оборудования, операции нанесения этикеток и маркировки на многих предприятиях по-прежнему выполняются с участием персонала либо посредством разрозненных автоматизированных устройств. Такой подход нередко приводит к возникновению ошибок позиционирования, снижению производительности и увеличению затрат на обслуживание производственной линии [2].

Одним из возможных путей решения данной проблемы является использование коллаборативных робототехнических систем. Подобные роботы отличаются возможностью безопасной работы рядом с человеком, простотой внедрения и высокой гибкостью при модернизации существующих производственных участков. Вместе с тем организация совместной работы нескольких роботизированных устройств требует эффективного механизма координации и обмена данными между всеми элементами комплекса.

В этой связи особое значение приобретает формирование единого информационного пространства, обеспечивающего согласованное функционирование оборудования, централизованный контроль производственного процесса и непрерывный обмен технологической информацией.

Целью проведённого исследования является разработка роботизированного комплекса для выполнения операций этикетирования и нанесения DataMatrix-кодов на основе двух коллаборативных роботов, объединённых общей информационно-управляющей средой.

Архитектура роботизированного комплекса. Предлагаемая структура роботизированного комплекса включает два коллаборативных манипулятора, конвейерную систему перемещения изделий, средства контроля технологического процесса, центральный вычислительный узел, базу данных и коммуникационную сеть для передачи информации между компонентами системы.

Организация технологического процесса основана на разделении производственных операций между двумя роботами. Первый исполнительный модуль

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

отвечает за нанесение этикетки на изделие, тогда как второй выполняет нанесение идентификационного кода DataMatrix на подготовленную поверхность. Подобный подход позволяет разграничить функциональные задачи, упростить программное обеспечение каждого робота и создать предпосылки для дальнейшего расширения комплекса.

Координация работы всех компонентов осуществляется посредством центрального управляющего сервера. Именно он принимает данные от датчиков, контролирует состояние оборудования, формирует команды для исполнительных устройств и отслеживает корректность выполнения отдельных этапов технологического цикла [3].

В отличие от распределённых схем управления, в разработанной системе отсутствует прямой обмен информацией между роботами. Все сообщения проходят через центральный сервер, выступающий единым координационным центром. Это решение позволяет снизить сложность программной реализации и повысить удобство масштабирования комплекса при подключении дополнительных устройств.

Передача информации организована по локальной сети Ethernet с использованием стека протоколов TCP/IP. Для представления управляющих и диагностических сообщений применяется формат JSON, который обеспечивает удобство обработки данных и совместимость с различными программными платформами [4].

Формирование единого информационного пространства. Под единым информационным пространством в рамках данного исследования понимается совокупность программных и аппаратных компонентов, обеспечивающих сбор, передачу, хранение и обработку информации, возникающей в процессе функционирования роботизированного комплекса.

Созданная информационная среда предназначена для координации работы оборудования, контроля последовательности выполнения операций, мониторинга технического состояния устройств и накопления данных о производственном процессе. Кроме того, система обеспечивает регистрацию всех значимых событий, формируя цифровую историю обработки каждого изделия.

Функционирование комплекса построено на событийном принципе управления. Вместо постоянного циклического опроса оборудования сервер реагирует на поступающие события, включая обнаружение изделия датчиками, завершение операций роботов, изменение состояния оборудования или возникновение аварийных ситуаций [5]. Такой подход позволяет снизить нагрузку на вычислительные ресурсы и повысить оперативность реакции системы.

Для обеспечения корректной последовательности выполнения операций используется модель конечных состояний изделия. Каждая единица продукции

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

проходит через набор заранее определённых этапов обработки, а информация о текущем состоянии хранится на сервере. Благодаря этому исключается возможность преждевременного запуска следующей операции и предотвращаются нарушения технологического процесса.

Существенным элементом информационного пространства является подсистема мониторинга. Роботы регулярно передают данные о собственном состоянии, текущем положении исполнительных механизмов и наличии диагностических сообщений. Полученная информация анализируется сервером и используется для контроля работоспособности оборудования.

Дополнительно реализованы механизмы обеспечения надёжности функционирования комплекса. При потере связи с одним из устройств либо возникновении критической ошибки система автоматически прекращает запуск новых производственных циклов и переводит оборудование в безопасное состояние до устранения причины сбоя.

Разработанная структура обладает высокой степенью масштабируемости. При необходимости в состав комплекса могут быть включены дополнительные роботизированные модули, камеры технического зрения, сканеры маркировки, системы контроля качества и другие средства промышленной автоматизации без изменения базовой логики функционирования информационной среды [6].

Экспериментальная проверка. Для оценки работоспособности предложенных технических решений был сформирован экспериментальный стенд, основу которого составили два коллаборативных робота Promobot M Edu. В качестве управляющего центра использовался персональный компьютер, выполняющий функции сервера управления, обработки информации и хранения данных о ходе технологического процесса.

Созданный стенд позволил воспроизвести основные этапы производственного цикла и проверить корректность взаимодействия всех элементов комплекса в условиях, максимально приближенных к реальной эксплуатации. Особое внимание уделялось исследованию механизмов координации действий роботов и оценке эффективности разработанного информационного пространства.

Программная часть комплекса реализована на языке Python. В основу программного обеспечения положена клиент-серверная модель, в которой управляющий сервер осуществляет распределение задач и контроль состояния оборудования, а роботы выполняют функции исполнительных устройств. Такое построение системы обеспечивает централизованное управление процессом и позволяет гибко изменять состав оборудования без существенной переработки программной логики [7].

В процессе испытаний моделировался полный цикл обработки изделия. После

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

поступления объекта в рабочую зону первый робот выполнял операцию нанесения этикетки и передавал информацию о завершении этапа на сервер. На основании полученного сообщения управляющая система инициировала запуск второго робота, выполнявшего операцию нанесения DataMatrix-кода. После окончания маркировки сведения о выполненных действиях фиксировались в базе данных, а изделие переводилось в состояние завершённой обработки.

Проведённые испытания показали устойчивую работу системы обмена данными и подтвердили корректность разработанных алгоритмов управления. В ходе экспериментов была обеспечена стабильная синхронизация действий роботов, сохранение требуемой последовательности операций и автоматическая регистрация событий технологического процесса.

Дополнительно была проверена работа механизмов диагностики и обработки нештатных ситуаций. Имитация потери связи и возникновения ошибок показала, что система способна своевременно обнаруживать отклонения в работе оборудования, переводить комплекс в безопасное состояние и предотвращать запуск новых производственных циклов до устранения причин неисправности.

Результаты экспериментальных исследований подтвердили возможность использования предложенной архитектуры в качестве основы для построения промышленных роботизированных комплексов. При переходе к использованию роботов Promobot M13 структура взаимодействия компонентов, принципы обмена данными и алгоритмы управления сохраняются практически без изменений, что свидетельствует о высокой степени адаптивности разработанного решения.

Выводы. В ходе проведённого исследования разработан роботизированный комплекс, предназначенный для автоматизации процессов этикетирования продукции и нанесения идентификационных кодов DataMatrix. В основу предложенного решения положено совместное использование двух коллаборативных роботов, выполняющих последовательные этапы единого технологического процесса.

Разработана архитектура комплекса, предусматривающая централизованное управление оборудованием посредством единого сервера. Такой подход позволил организовать согласованное функционирование всех компонентов системы, упростить взаимодействие между исполнительными устройствами и обеспечить возможность дальнейшего расширения комплекса.

Сформирована структура единого информационного пространства, обеспечивающая сбор, передачу, обработку и хранение производственных данных. Реализованная информационная среда выполняет функции синхронизации работы роботов, мониторинга состояния оборудования, регистрации технологических событий и накопления статистической информации о ходе производственного процесса.

Для координации действий оборудования разработаны алгоритмы управления,

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

основанные на событийном принципе функционирования и модели конечных состояний изделия. Использование данного подхода позволило обеспечить соблюдение последовательности операций и повысить устойчивость системы к возникновению нештатных ситуаций.

Практическая реализация выполнена на экспериментальном стенде с использованием роботов Promobot M Edu. Проведённые испытания подтвердили корректность информационного взаимодействия между компонентами комплекса, работоспособность механизмов синхронизации и возможность стабильного выполнения полного цикла обработки продукции.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что разработанное решение обладает необходимой гибкостью для дальнейшего развития и может быть адаптировано к условиям промышленного производства. Предложенные принципы организации единого информационного пространства могут использоваться при создании многороботных технологических комплексов, ориентированных на реализацию концепции цифрового производства и требований Индустрии 4.0.

References

1. Groover M.P. Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing. Hoboken: Wiley, 2019. 856 p.

2. Галин Р.Р., Широкий А.А., Магид Е.А., Мещеряков Р.В. Эффективное функционирование смешанной неоднородной команды в коллаборативной робототехнической системе // Информатика и автоматизация. 2021. Т. 20. № 6. С. 1224–1253.

3. Lasi H. et al. Industry 4.0 // Business & Information Systems Engineering. 2014. Vol. 6. P. 239–242.

4. Zhong R.Y., Xu X., Klotz E., Newman S.T. Intelligent manufacturing in the context of Industry 4.0 // Engineering. 2017. Vol. 3(5). P. 616–630.

5. Monostori L. Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges // Procedia CIRP. 2014. Vol. 17. P. 9–13.

6. Colombo A.W., Karnouskos S., Bangemann T. Towards the next generation of industrial cyber-physical systems // IEEE Industrial Informatics. 2014. Vol. 10(1). P. 1–4.

7. Villani V., Pini F. Collaborative Robotics: Technologies and Applications. Cham: Springer, 2020. 310 p

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 004.42:004.932

Evstigneev N.A., Trofimenko E.V. Development of an interactive environment for visualizing step-by-step execution of algorithms on dynamic data structures

Разработка интерактивной среды визуализации пошагового исполнения алгоритмов над динамическими структурами данных

Evstigneev Nikita Alekseevich,
Student of the Faculty of Applied Mathematics, Informatics and Mechanics,
Voronezh State University, Voronezh
Trofimenko Elena Vladimirovna,
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Mathematical Support of Computers, Voronezh State University, Voronezh
Евстигнеев Никита Алексеевич,
обучающийся факультета прикладной математики, информатики и механики, Воронежский государственный университет, г. Воронеж
Трофименко Елена Владимировна,
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математического обеспечения ЭВМ, Воронежский государственный университет, г. Воронеж

Abstract. *The article discusses the development of an interactive educational environment designed to visualize the step-by-step execution of algorithms operating on dynamic data structures. The relevance of the topic is determined by the fact that students often have difficulties not only with understanding source code, but also with representing the internal processes of program execution: changes in variable values, creation of objects in dynamic memory, pointer redirection and formation of the function call stack. The proposed system addresses this problem by executing user code in a controlled interpreted environment and by synchronously displaying the state of virtual memory. The paper describes the main stages of program processing: lexical analysis, syntax analysis, construction of an abstract syntax tree, interpretation of instructions, saving state snapshots and creating a graphical representation of data structures. Special attention is paid to the virtual memory model, which makes it possible to display dynamic objects and relations between them as a graph. The developed environment is implemented using Godot Engine and is intended for use in the educational process when studying pointers, linked lists, binary search trees, recursion and the principles of step-by-step program execution.*

Keywords: *algorithm visualization, dynamic data structures, interpreter, abstract syntax tree, virtual memory, call stack, Godot Engine.*

Аннотация*. В статье рассматривается разработка интерактивной образовательной среды, предназначенной для визуализации пошагового исполнения алгоритмов над динамическими структурами данных. Актуальность темы связана с тем, что при изучении алгоритмов обучающиеся часто испытывают трудности не только с пониманием исходного кода, но и с представлением внутренних процессов выполнения программы: изменения значений переменных, создания объектов в динамической памяти, перенаправления указателей и формирования стека вызовов функций. Предлагаемая программа решает данную проблему за счёт выполнения пользовательского кода в контролируемой интерпретируемой среде и синхронного отображения состояния виртуальной памяти. В работе описаны основные этапы обработки программы: лексический анализ, синтаксический анализ, построение абстрактного синтаксического дерева, интерпретация инструкций, сохранение снимков состояния и построение графического представления структур данных. Особое внимание уделяется модели виртуальной памяти, позволяющей отображать динамические объекты и связи между ними в виде графа. Разработанная среда реализована с применением Godot Engine и ориентирована на использование в учебном процессе при изучении указателей, связных списков, бинарных деревьев поиска, рекурсии и принципов пошагового выполнения программ.*

Ключевые слова: *визуализация алгоритмов, динамические структуры данных, интерпретатор, абстрактное синтаксическое дерево, виртуальная память, стек вызовов, Godot Engine.*

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Рецензент: Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

Введение

Изучение алгоритмов и структур данных является одной из базовых задач подготовки специалистов в области программирования. Однако для начинающих разработчиков эта тема часто оказывается затруднительной, поскольку большинство процессов, происходящих во время выполнения программы, скрыто от пользователя. По исходному коду не всегда очевидно, каким образом изменяются значения переменных, как создаются объекты в памяти, как формируются связи между элементами структуры данных и как выполняются вложенные или рекурсивные вызовы функций [1].

Традиционные учебные материалы позволяют объяснить теоретическую сторону алгоритма, но в основном демонстрируют отдельные статические состояния. Такой формат полезен для первичного знакомства с темой, однако он не всегда помогает проследить динамику выполнения программы. Например, при изучении связного списка важно увидеть не только конечную последовательность узлов, но и момент создания каждого узла, изменение указателя next, обработку пустого списка и переход к следующему элементу. Аналогичная проблема возникает при изучении бинарных деревьев поиска, где необходимо понимать, как новая вершина проходит путь от корня к месту вставки.

Существующие онлайн-визуализаторы алгоритмов существенно повышают наглядность обучения, но часто ограничены заранее подготовленными сценариями, фиксированными структурами данных или конкретным языком программирования [2, 3]. Классические отладчики, напротив, позволяют анализировать реальные программы, но их интерфейс ориентирован на профессиональную разработку и не всегда удобен для учебных целей. Кроме того, многие отладчики показывают сложные структуры данных в текстовом виде, из-за чего связи между объектами воспринимаются недостаточно наглядно.

В связи с этим актуальной является разработка специализированной интерактивной среды, которая сочетает пошаговое выполнение пользовательского кода, визуализацию состояния памяти, отображение динамических структур данных и анализ стека вызовов. Такая программа может использоваться как вспомогательный инструмент при изучении алгоритмов, указателей, рекурсии и принципов работы программ.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Цель и постановка задачи

Целью работы является разработка интерактивной программной среды, обеспечивающей пошаговое выполнение пользовательских алгоритмов и визуальное отображение состояния динамических структур данных. В качестве предметной области выбраны алгоритмы, работающие со связными списками и бинарными деревьями поиска, поскольку данные структуры хорошо демонстрируют роль динамической памяти, указателей и ссылочных связей.

Для достижения цели были определены следующие основные задачи: разработать лексический анализатор для выделения токенов исходного текста; реализовать синтаксический анализатор для построения внутреннего представления программы; спроектировать модель абстрактного синтаксического дерева; реализовать интерпретатор, поддерживающий пошаговое выполнение; создать подсистему виртуальной памяти для моделирования динамических объектов; разработать механизм сохранения состояний программы; реализовать графическую визуализацию объектов памяти, связей между ними и стека вызовов.

Входными данными программы является программа на специально разработанном подмножестве C-подобного языка. Такой выбор синтаксиса обусловлен тем, что большинство базовых курсов алгоритмов и структур данных использует конструкции, близкие к языкам C и C++. Поддерживаемое подмножество включает объявления переменных, арифметические и логические выражения, условные операторы, циклы, пользовательские функции, рекурсивные вызовы, указатели и операции работы с динамической памятью.

Результатом работы модуля является не только вычисление программы, но и последовательность визуальных состояний, отражающих процесс её выполнения. Пользователь получает возможность запускать программу, выполнять её пошагово, возвращаться к предыдущим состояниям, наблюдать стек вызовов и анализировать изменения в виртуальной памяти.

Методы и архитектура программы

В основе разработанного решения лежит интерпретационный подход. В отличие от компиляции в машинный код, интерпретация позволяет сохранять полный контроль над выполнением каждой инструкции. После обработки отдельного оператора подсистема может зафиксировать состояние памяти, сохранить текущую позицию выполнения и обновить визуальное представление. Для образовательной программы такой подход оказывается более удобным, чем компиляция, поскольку главным критерием является не максимальная скорость выполнения, а возможность детального наблюдения за процессом [4].

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Архитектура программы построена как последовательный конвейер обработки данных. На первом этапе исходный текст поступает в лексический анализатор. Лексер выполняет посимвольный просмотр входной строки и формирует последовательность токенов: ключевых слов, идентификаторов, числовых литералов, операторов, разделителей и специальных символов. Наличие отдельного этапа лексического анализа упрощает последующий синтаксический разбор, поскольку парсер работает уже не с отдельными символами, а со структурированным потоком элементов языка.

На втором этапе токены передаются синтаксическому анализатору. В подсистеме используется разделение разбора на две части: анализатор структурных конструкций и анализатор выражений. Первый отвечает за функции, блоки инструкций, условные операторы, циклы и операторы возврата. Второй используется для построения выражений с учётом приоритетов операций, вложенных скобок, вызовов функций и операций доступа к полям объектов.

Результатом синтаксического анализа является абстрактное синтаксическое дерево, или AST. Использование AST позволяет отделить исходный текст от дальнейшего выполнения программы. Интерпретатор работает уже не со строками кода, а с унифицированной древовидной структурой, в которой каждый узел соответствует конкретной конструкции языка. Такой подход широко применяется в компиляторах и интерпретаторах, поскольку облегчает анализ и выполнение программ [5, 6].

Центральным компонентом программы является интерпретатор. Он выполняет обход AST и обрабатывает узлы в соответствии с их типом. Для объявлений переменных создаются записи в текущей области видимости, для присваиваний вычисляется правая часть и изменяется значение левой части, для условных операторов проверяется логическое выражение, а для циклов выполняется повторная обработка тела до нарушения условия. При вызове функции создаётся новый кадр стека, содержащий параметры, локальные переменные и служебную информацию о текущей позиции выполнения.

Для моделирования динамических структур данных реализована виртуальная память. Она условно разделяется на область локальных переменных в кадрах стека и динамическую область, в которой размещаются создаваемые во время выполнения объекты. Каждый объект имеет уникальный идентификатор, тип и набор полей. Указатели моделируются как связи между переменными и объектами либо между объектами динамической памяти. Такое представление позволяет строить граф объектов, пригодный для визуализации связных списков, деревьев и других структур.

Важной частью архитектуры является подсистема хранения состояний. После выполнения значимого шага интерпретатор формирует снимок, включающий состояние

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

виртуальной памяти, стек вызовов, значения переменных и текущую инструкцию. Набор таких снимков образует историю выполнения программы. Пользователь может перемещаться по этой истории назад и вперёд без повторного запуска программы с начала.

В таблице 1 представлены основные компоненты разработанной программы и их назначение.

Таблица 1.

Основные компоненты разработанной программы

Компонент	Назначение
Лексический анализатор	Преобразует исходный текст в последовательность токенов.
Синтаксический анализатор	Проверяет структуру программы и формирует AST.
Интерпретатор	Выполняет узлы AST и управляет пошаговым исполнением.
Виртуальная память	Хранит переменные, динамические объекты и связи между ними.
Хранилище состояний	Фиксирует снимки выполнения для навигации по истории.
Визуализатор	Отображает объекты, связи, структуры данных и стек вызовов.

Реализация визуализации

Графическая часть проекта реализована средствами Godot Engine. Выбор игрового движка обусловлен наличием готовых инструментов для работы с двумерной графикой, сценами, узлами интерфейса и пользовательским вводом. Каждый объект виртуальной памяти отображается как отдельный графический элемент, а связи между объектами показываются линиями или направленными стрелками. Такой способ представления особенно полезен при изучении структур, в которых важную роль играют ссылки между элементами [7].

При визуализации связного списка узлы размещаются в линейной последовательности. Пользователь может наблюдать, как после добавления нового элемента изменяется поле next предыдущего узла, а при работе с двусвязным списком дополнительно отображаются обратные связи. Подобное представление помогает понять, почему изменение одного указателя может повлиять на доступность всей структуры данных.

При отображении бинарного дерева поиска используется иерархическая компоновка. Корневой узел располагается выше дочерних, левая и правая ветви визуально разделяются. После каждой операции вставки можно проследить путь сравнения значений и увидеть, в какой ветви появляется новый элемент. Для более

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

сложных деревьев важной задачей становится автоматическое размещение узлов так, чтобы связи не пересекались и структура оставалась читаемой [8].

Отдельно визуализируется стек вызовов функций. Каждый кадр стека содержит имя функции, параметры и локальные переменные. Верхний кадр соответствует функции, выполняемой в текущий момент. При рекурсивных вызовах пользователь видит постепенное увеличение глубины стека, а затем последовательное удаление кадров при возврате из функций. Это особенно важно при объяснении рекурсии, поскольку позволяет связать математическое определение рекурсивной функции с реальным процессом выполнения программы.

Результаты работы

Проверка работоспособности программы проводилась на наборе программ, содержащих основные конструкции поддерживаемого языка. На первом этапе была подтверждена корректность лексического анализа: исходный код разбивался на ключевые слова, идентификаторы, литералы, операторы и разделители. Далее синтаксический анализатор строил AST, в котором отражались функции, объявления переменных, выражения и управляющие конструкции.

Интерпретатор был проверен на обработке арифметических выражений, условных операторов, циклов, пользовательских функций и рекурсивных вызовов. В частности, вычисление выражений выполнялось с учётом приоритета операций, условные операторы корректно выбирали ветвь исполнения, а циклы обновляли состояние переменных на каждой итерации. При вызове пользовательской функции создавался новый кадр стека, в который передавались значения аргументов.

Для проверки рекурсивных вызовов использовалась программа вычисления факториала. Во время выполнения подсистема последовательно создавала кадры стека для каждого уровня рекурсии, сохраняла локальные значения параметров и затем возвращала результат в вызывающую функцию. Визуализация стека позволила наблюдать не только итоговое значение, но и сам процесс накопления и возврата вычислений.

Работа виртуальной памяти была рассмотрена на программах, создающих узлы бинарного дерева и связного списка. После выполнения операций создания объектов в динамической памяти появлялись узлы с уникальными идентификаторами, а присваивание полей формировало связи между ними. Визуализатор корректно отображал созданные объекты и перестраивал графическое представление после изменения состояния памяти.

Полученные результаты показывают, что разработанная программа выполняет полный цикл обработки пользовательской программы: от исходного текста до интерактивной визуализации состояния памяти. Практическая ценность решения

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

заключается в том, что пользователь видит связь между конкретной инструкцией программы и изменением структуры данных. Это снижает уровень абстракции и делает изучение алгоритмов более наглядным.

Обсуждение

Предложенный подход отличается от обычных статических материалов тем, что демонстрирует алгоритм как процесс, разворачивающийся во времени. В отличие от универсальных онлайн-визуализаторов, программа ориентирована на работу с пользовательским кодом и на отображение динамической памяти. В отличие от классических отладчиков, интерфейс сосредоточен на учебной задаче: показать переменные, объекты, связи и стек вызовов в форме, понятной начинающему разработчику.

К преимуществам разработанной архитектуры можно отнести модульность и расширяемость. Лексический анализатор, синтаксический анализатор, интерпретатор, виртуальная память и визуализатор реализованы как отдельные подсистемы. Это позволяет в дальнейшем добавлять новые конструкции языка, новые типы данных и новые способы визуального представления без полной переработки программного продукта.

В то же время разработанное решение имеет ряд ограничений. Поддерживается только ограниченное подмножество C-подобного языка, отсутствует работа с внешними библиотеками, файловой системой и многопоточностью. Кроме того, визуализация ориентирована преимущественно на небольшие учебные примеры. При большом количестве объектов потребуется развитие алгоритмов автоматической компоновки и масштабирования сцены.

Направления дальнейшего развития могут включать расширение набора поддерживаемых типов данных, добавление новых структур, улучшение алгоритмов автоматической компоновки графов, а также разработку набора учебных сценариев для преподавателей. Перспективным направлением является добавление режима сравнения состояний, при котором программа явно выделяет изменения, произошедшие между двумя соседними шагами выполнения.

Заключение

В статье рассмотрена разработка интерактивной среды визуализации пошагового исполнения алгоритмов над динамическими структурами данных. Предложенная реализация основана на собственной цепочке анализа и выполнения программ: лексический анализ, синтаксический анализ, построение абстрактного синтаксического дерева, интерпретация инструкций и сохранение снимков состояния.

Реализованная виртуальная модель памяти позволяет представлять динамические объекты и указательные связи в виде графа, удобного для визуализации.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Пошаговый режим и история состояний дают пользователю возможность анализировать выполнение программы не только по конечному результату, но и по последовательности промежуточных изменений. Отображение стека вызовов дополняет визуализацию памяти и помогает изучать функции и рекурсию.

Таким образом, разработанная среда может использоваться при изучении алгоритмов, структур данных и основ управления памятью. Её применение способствует более наглядному пониманию связи между исходным кодом программы и изменением внутреннего состояния программы в процессе выполнения.

References

1. Кормен Т. Х., Лейзерсон Ч. И., Ривест Р. Л., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ. 3-е изд. М.: Вильямс, 2013. 1323 с.

2. Hundhausen C. D., Douglas S. A., Stasko J. T. A Meta-Study of Algorithm Visualization Effectiveness // Journal of Visual Languages & Computing. 2002. Vol. 13. No. 3. P. 259-290.

3. Naps T. L. et al. Exploring the role of visualization and engagement in computer science education // ACM SIGCSE Bulletin. 2003. Vol. 35. No. 2. P. 131-152.

4. Guo P. J. Online Python Tutor: Embeddable Web-Based Program Visualization for CS Education // Proceedings of the 44th ACM Technical Symposium on Computer Science Education. New York: ACM, 2013. P. 579-584.

5. Ахо А. В., Лам М. С., Сети Р., Ульман Д. Д. Компиляторы: принципы, технологии и инструментарий. 2-е изд. М.: Вильямс, 2008. 1175 с.

6. Nystrom R. Crafting Interpreters. Genever Benning, 2021. 639 p.

7. Седжвик Р., Уэйн К. Алгоритмы на Java. 4-е изд. М.: Вильямс, 2013. 843 с.

8. Reingold E. M., Tilford J. S. Tidier Drawings of Trees // IEEE Transactions on Software Engineering. 1981. Vol. SE-7. No. 2. P. 223-228.

9. Godot Engine Documentation. URL: https://docs.godotengine.org/ (дата обращения: 10.03.2026).

10. Pressman R. S., Maxim B. R. Software Engineering: A Practitioner’s Approach. 9th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2020. 671 p.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 620.9

Vykhodtseva E., Vykhodtseva K., Shiribazarov A. Microbial fuel cell: investigation of an innovative dual-purpose system

Vykhodtseva Elizabeth
Vykhodtseva Kira
Shiribazarov Aleksey
Students

Abstract. *In the context of the global search for sustainable energy alternatives and escalating environmental challenges, this research represents a significant step into the future of biotechnology through the development of Microbial Fuel Cells (MFCs). The study is built upon the synergy of microbiology and electrochemistry, proposing an innovative approach to creating closed-loop systems where organic waste is transformed from a pollutant into a valuable energy resource. The innovation of the project lies in the implementation of the "double benefit" concept: profound biological wastewater treatment combined with the simultaneous generation of "green" electricity without external energy consumption.*

The experimental phase is characterized by a high level of technical depth: we designed and tested a dual-chamber MFC prototype using accessible materials, highlighting the potential for widespread implementation of decentralized treatment systems. The rigor of the study is evidenced by a five-day monitoring of the microbial consortium's metabolic activity, establishing a direct correlation between bacterial growth phases and electrochemical dynamics. The results demonstrated not only the generation of stable power sufficient for autonomous monitoring systems but also exceptional bioremediation efficiency, resulting in the complete mineralization of the organic substrate and visible clarification of the medium.

While this research holds particular significance for preserving the unique ecosystem of the Baikal region, its potential extends far beyond local applications. This study serves as a vital contribution to the global circular economy and bioenergetics. Harnessing microbial potential to protect natural resources and create autonomous energy sources is a definitive step toward global sustainability and environmental engineering of the future, opening newhorizons for a cleaner, self-sufficient world.

Keywords: *Microbial fuel cells (MFCs), bioelectricity generation, wastewater bioremediation, exoelectrogens, short-circuit current, biochemical oxygen demand (BOD), cost-effective materials, green energy recovery.*

Рецензент: Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

Introduction

In the face of the contemporary global energy crisis and intensifying environmental degradation, developing ecologically benign renewable energy technologies represents a fundamental challenge for scientific and technological progress. Conventional wastewater treatment plants are characterized by high energy intensity and substantial operational costs. However, the organic pollutants in wastewater represent a valuable, latent reservoir of chemical energy. An elegant alternative to classical methods is represented by microbial fuel cell (MFC) technology, which implements a synergistic paradigm: concurrent bioremediation of effluents and direct bioelectricity generation. Unlike abiotic fuel cells, MFCs operate under ambient environmental conditions, obviate the need for expensive noble-metal catalysts, and utilize organic waste as a renewable substrate. The scientific novelty of this study lies in the design, fabrication, and validation of an economically viable MFC configuration capable of

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

achieving high pollutant degradation rates while maintaining stable electrochemical performance [Table 1].

It is hypothesized that coupling the anaerobic oxidation of organic substrates by exoelectrogenic microorganisms within a scalable MFC architecture can yield sufficient electrical power to support the autonomous operation of low-power, wireless telemetric sensors for environmental monitoring.

The objective of this work is to comprehensively evaluate the electrochemical performanceand treatment efficiency of a fabricated, cost-effective MFC prototype utilizing accessible structural materials under organic load.

Research Tasks:

- Perform a systematic literature review on the mechanisms of extracellular electron transfer (EET) and the configurations of bioelectrochemical systems;
- Design and assemble a laboratory-scale MFC prototype, optimizing electrode geometry and selecting an appropriate membrane separator;
- Conduct a physicochemical analysis of the raw wastewater to establish baseline parameters of chemical oxygen demand (COD), turbidity, and electrical conductivity;
- Initiate the bioelectrochemical system and perform continuous monitoring of its current-voltage characteristics (including open-circuit voltage, short-circuit current, and power density) using a digital multimeter;
- Evaluate the degradation kinetics of organic pollutants by quantitatively comparing pre- and post-treatment COD levels;
- Establish the correlation between substrate concentration and MFC power output to assess the scalability and practical feasibility of the technology.

Table 1

Key Operational and Bioremediation Metrics of the MFC

Efficiency Metric	**Physico-Chemical Definition**	**Typical Operating Range**	**Global and Technological Significance**
Coulombic Efficiency (CE, %)	The fraction of recovered electrons transferred to the anode relative to the theoretical maximum available from substrate oxidation.	**10% – 90%** (highly dependent on substrate complexity and microbial consortia)	Measures the completeness of organic waste-to-electricity conversion. High CE enables the economic utilization of recalcitrant and toxic waste streams.
Voltage Efficiency (VE, %)	The ratio of actual operating cell voltage to the theoretical thermodynamic electromotive force (EMF).	**30% – 60%** (constrained by electrochemical overpotentials)	Reflects the quality and design of electrode materials and membranes. Optimizing VE is the key pathway toward grid-scale urban commercialization.
Overall Energy Efficiency (EE, %)	The total energy recovery efficiency ($EE = CE \times VE$), representing net electrical energy output relative to the chemical energy of the substrate.	**5% – 45%**	The ultimate benchmark for evaluating MFCs as viable alternative power sources, demonstrating the potential for self-powered wastewater treatment.
Organic Degradation Efficiency (COD/BOD Removal, %)	The percentage of chemical/biochemical oxygen demand successfully eliminated from the effluent.	**70% – 95%**	Defines the environmental remediation capacity. High removal rates facilitate safe water discharge and reuse, addressing global freshwater scarcity.
Resource Recovery Yield (%)	The efficiency of recovering valuable resources, such as heavy metals or nutrients (N, P), accumulated at the cathode.	**50% – 99%** (specifically for targeted heavy metals like Cu, Cr, or Au)	Drives the transition to a Circular Economy by transforming hazardous industrial runoffs into localized sources of high-value raw materials.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Results&conclusion.

This research successfully demonstrates the viability of cost-effective microbial fuel cell (MFC) technology as a synergistic solution for concurrent bioenergy recovery and deep wastewater remediation. By validating stable electrical outputs alongside significant effluent clarification using accessible materials, the study confirms that bioelectrochemical systems can effectively bridge the gap between waste management and sustainable power generation. The identified prospects for future implementation—including electrode optimization, reduction of internal resistance, and transition to continuous-flow architectures—highlight a clear pathway toward transforming conventional treatment facilities into decentralized, self-powered bio-refineries. Ultimately, this study provides a foundational framework for the development of autonomous environmental monitoring systems and contributes significantly to the global transition toward a circular, carbon-neutral economy.

References

1. Patent No. 2833628 C1 H01M 8/16, Russian Federation, Microbial Fuel Cell: No. 2024123330; filed 13.08.2024; published 28.01.2025 / Safronova M. E., Bulychev V. V., Ilyin V. K., Kusacheva S. A., Kalmykov V. V., Loginova A. Yu., Grossman M. F., Golubina S. A., Ponomarev A. I.
2. Utility Model Patent No. 162308, Russian Federation, IPC H01M 8/16. Bioelectrochemical Fuel Cell: No. 2015141501; filed 29.09.2015; published 10.06.2016 / Paperny V. L., Borokhoev N. D., Stom D. E., Tolstoy M. Yu., Saksonsov M. N., Koshelev N. A., Shipitsyn N. V.; applicant: Irkutsk State University.
3. Patent No. 209073 H01M 8/16, Russian Federation, Microbial Fuel Cell: No. 2021117491; filed 16.06.2021; published 01.02.2022 / Maseykin N. V., Maseykina A. A., Stepanenko I. S.
4. Research paper on Industrial Biotechnology by Denis Leonidovich Dubovets.
5. Book “Microbial Fuel Cells” by Bruce Logan;
6. Textbook “Microbial Fuel Cells” by S. V. Alferov and T. A. Kuznetsova.
7. https://www.computerra.ru/213622/uluchshennyie-mikrobnyie-toplivnyie-elem
8. https://www.sbras.info/articles/science/mikrobnye-toplivnye-elementy-chistaya-energiya
9. https://cyberleninka.ru/article/n/mikrobnyy-toplivnyy-element-kak-istochnik-alternativnoy-energetiki
10. https://patents.google.com/patent/RU145009U1/ru
11. https://www.mathnet.ru/links/ca5aed4e24bb10823d6d0b2f189a8527/jtf5065.pdf

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

TRANSPORT AND MOBILITY

UDC 691.54

Khalikov R.M., Ivanova O.V., Latypova Z.B., Pavlov S.Y., Glazachev A.O. Resource-saving production of geopolymer composites based on high-tonnage industrial waste for use in road construction

Khalikov Rauf Muzagitovich,
PhD in Chemistry, Associate Professor of the Department
of "Highways, Bridges and Transport Structures"
"Ufa State Petroleum Technological University", Russia, Ufa;
Ivanova Olga Vladimirovna,
PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of
"Operation of Land Transport in Petroleum and Gas Industry and Building,
"Ufa State Petroleum Technological University",
Russia, Ufa;
Latypova Zakira Badretdinovna,
PhD in Geography, Associate Professor of the Department
of "Tourism, Geo-Urban Studies and Economic Geography",
"Ufa University of Science and Technology", Russia, Ufa;
Pavlov Stanislav Yuryevich,
PhD in Law, Associate Professor of the Department of "Financial and Administrative Law"
"Ufa University of Science and Technology", Russia, Ufa;
Glazachev Anton Olegovich,
PhD in Engineering, Associate Professor of the Department
of " Highways, Bridges and Transport Structures",
"Ufa State Petroleum Technological University", Russia, Ufa

Abstract. *As an energy-saving alternative to Portland cement, geopolymer composites are promising, which are characterized by low curing temperatures, low greenhouse carbon dioxide emissions, as well as a wide possibility of recycling multi-tonnage regional waste. The article is aimed at considering energy-saving technologies for the production of geopolymer composite materials, which are in demand in road transport construction. The most important initial components of a geopolymer composite are an aluminosilicate component (including many-tonnage ash waste, artificial slags, etc.) and an activating alkaline component. The physico-chemical mechanism of alkaline activation of technogenic waste for the production of geopolymer binders consists in the dissolution of aluminosilicate microparticles under the influence of concentrated alkalis (sodium, potassium) and subsequent stepwise polycondensation. It has been established that for the technological production of geopolymer composites with a strength of 27-52 MPa, the average size of microparticles of thermal power plant fly ash should be 18 microns, and the ratio of alkaline activator: ash is in the range of 0.47-0.72. Geopolymer composite materials based on industrial waste: slags and slurries can be effectively used for the installation of upper and lower layers of ground bases in highways of various transport and operational categories. By 2030 year, a systematic approach to the resource-saving disposal of large-tonnage industrial waste in Russia will make it possible to use up to 50% of technogenic raw materials in road construction.*

Keywords: *resource protection, multi-tonnage waste, geopolymer, transport infrastructure, road engineering.*

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Рецензент: Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

One of the technological challenges in the current geopolitical instability is the in-demand transition to resource-saving technologies for recycling many-tonnage industrial waste [1]. Geopolymer composites act as a promising energy-saving alternative to Portland cement and are characterized by low curing temperatures, low greenhouse gas emissions, as well as a wide possibility of recycling multi-tonnage regional waste. Innovative areas of frontier development of geopolymer multifunctional composite materials for road construction in the Russian Federation are relevant for the successful implementation of the national project "Infrastructure for life".

The purpose of this article is to consider energy-saving technological solutions for the production of geopolymer composite materials, which are in demand in regional road and transport building.

As part of the formation of an environmentally sustainable green road network, the expanded use of geopolymer composites, which are obtained as a result of a low-temperature reaction of alkaline activation of aluminosilicate man-made raw materials, is of particular interest. Portland cement clinker is traditionally fired at a temperature of 1450°C, and the technological process is extremely energy-intensive. The most important advantage of the frontier technology of geopolymer production in comparison with the multi-tonnage production of Portland cement binder is the absence of high-temperature heat treatment and a sharp decrease in greenhouse CO_2 emissions. The cardinal solution to the problem of reducing the material consumption of the Russian road building industry and reducing damage to the surrounding regional ecosystem of Bashkortostan is facilitated by the partial or complete substitution of natural mineral raw materials in transport construction with geopolymer composites based on high-tonnage industrial waste [2, 3].

The main initial components of geopolymer composite concrete are an aluminosilicate component (including ash waste, technogenic slags, etc.) and an activating alkaline component. Overburden clays, ashes from thermal power plants, blast furnace slags, as well as other natural rock minerals and high-tonnage industrial waste can be technologically used as raw materials for composite geopolymers [4, 5].

In the physico-chemical process of technological manufacturing of a geopolymer composite by alkaline activation of technogenic ash and slag, the most important stages can be distinguished:

at the 1st stage, spontaneous dispersion of aluminosilicate slag particles occurs in an alkaline medium, which results in the breaking of covalent –Si–O–Si– and–Al–O–Al–chemical bonds; as a result, alkaline colloidal sols are formed;

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

At the 2nd stage, polycondensation cluster nanostructures are formed due to coagulation and gelation of aluminosilicate fragments.

The mechanism of alkaline activation of ash and slag waste for the production of geopolymer binders consists in the dissolution of aluminosilicate microparticles under the action of concentrated alkalis (sodium, potassium) and subsequent stepwise polycondensation [6]. Tetrahedral silicon-oxygen ($[SiO_4]^{4-}$) and aluminum-oxygen ($[AlO_4]^{5-}$) anions first form intermediates of fragmentary oligomers, –Al–O–Si–, which subsequently transform into an amorphous polymer gel of aluminosilicate hydrate macromolecules (Figure 1).

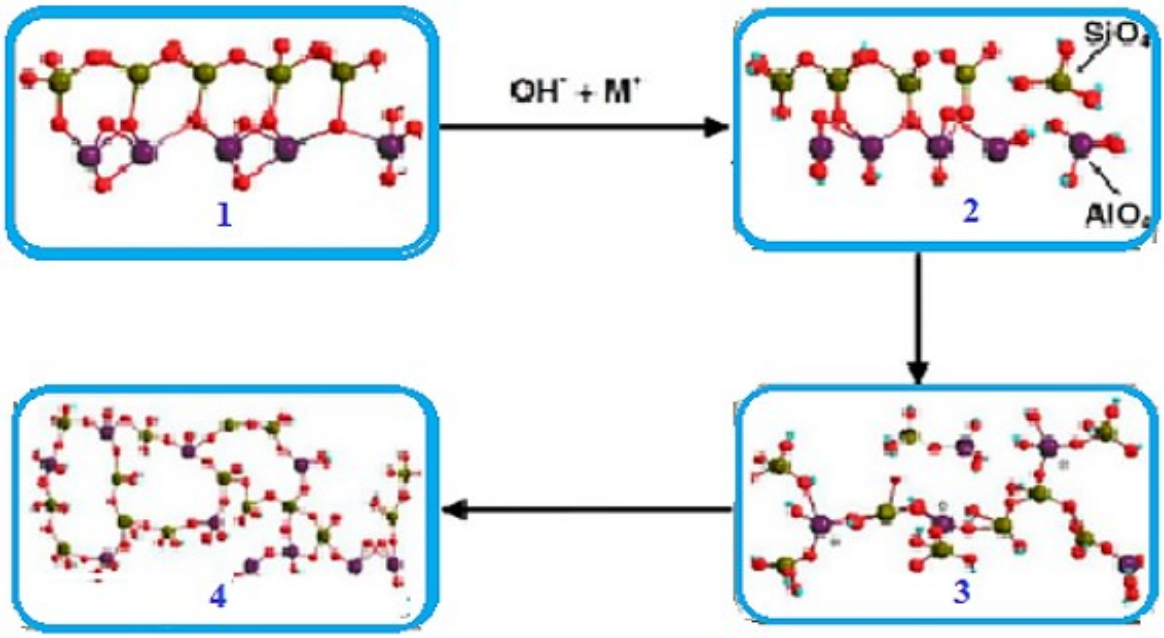


Figure 1. Physico-chemical mechanism of formation of macromolecules of aluminosilicate geopolymer gels (M^+ – alkaline cations):
1 – aluminosilicate ash and slag; **2** – colloidal dispersion;
3 – oligomeric sol; **4** – macromolecular gel

Then on the granules of the primary solid phase at a curing temperature of 75-90°C fractal geopolymer macromolecules gradually crystallize. Currently, alumosilicate ($nAl_2O_3 \cdot mSiO_2$) initial precursors are considered as man-made raw materials for geopolymer binders: fly ash from coal combustion, metallurgical slags, bauxite sludge, waste from mining and processing of rocks, as well as building waste from the reconstruction demolition of transport buildings and constructions [7].

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Promising technologies for the synthesis of binder compositions based on the use of high-tonnage waste and chemical by-products from industry include the production of geopolymer composites based on mechanically activated alumosilicate raw materials, whose polymerization hardening is activated by using concentrated alkali solutions. The activating alkaline solution was obtained from aqueous solutions of sodium hydroxide and silicate; percentage composition by weight: NaOH = 12%; Na_2SiO_3 = 30% and H_2O = 58%. The developed geopolymer composite has a compressive strength of 58 MPa after heat treatment at a temperature of 90°C for six hours; significant water resistance (at least W10) and low water absorption.

Complementary factors of optimized polymerization of geopolymers: activators, feedstocks (multicomponent minerals $nAl_2O_3 \cdot mSiO_2$, blast furnace slag, etc.), reinforcing fibers and fillers affect the physical and mechanical characteristics of geopolymer composites. The scheme of high-tech formation of perspective geopolymer composites based on high-tonnage industrial waste is shown in Figure 2.

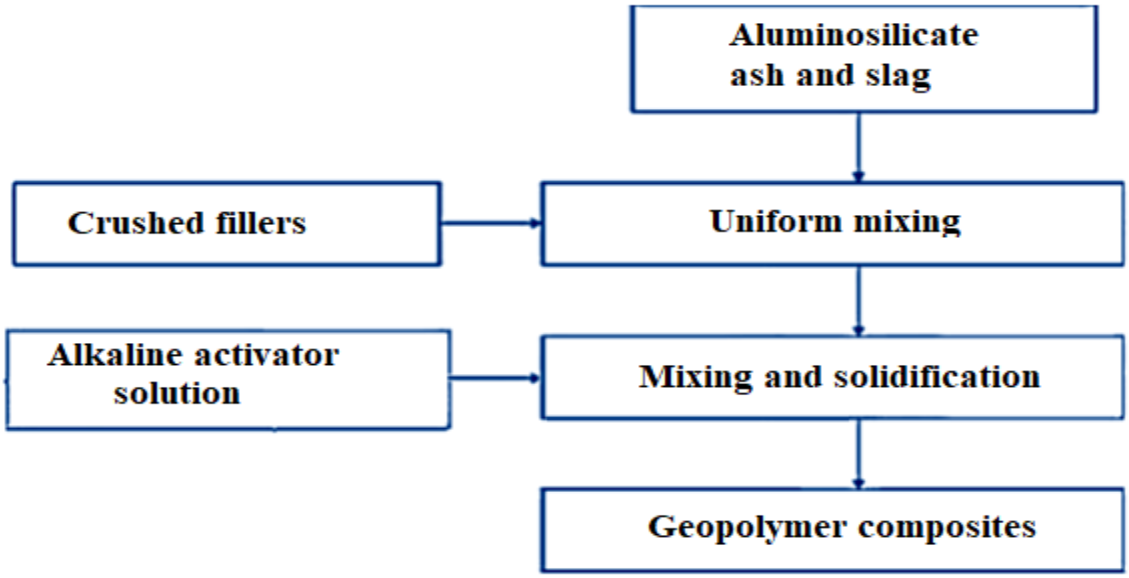


Figure 2. Scheme of formation of demanded geopolymer composites

For optimal use of geopolymer composites based on many-tonnage waste, it is necessary to compare technical and economic parameters: the cost and maintenance-free time of operation of highways in order to technologically objectively weigh the energy-saving advantages and disadvantages. For example, in the traditional production of 1 ton of Portland cement clinker, 0.55 tons of carbon dioxide (CO_2) are released; in addition, about 0.4 tons of CO_2 are generated by the combustion of hydrocarbon fuels; as a result, the production of 1 ton of Portland cement building purposes causes emissions of 0.95 tons of CO_2 into the

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

atmosphere, which leads to a significant increase in the carbon footprint. Resource-saving high-tech waste disposal methods during the production of geopolymers, which maximize the involvement of many-tonnage waste in recycling, must comply with the fundamental principles of sustainable development of human civilization (Figure 3).



Figure 3. High-tech advantages of resource-saving use of geopolymer composites

Unlike the technology of obtaining Portland cement, the production of geopolymer composite binders does not have the most energy–intensive stage – high-temperature firing, which is the main advantage. Geopolymer composites based on the aluminosilicate precursor: fly ash are optimally suited for the structural construction of road transport constructions, providing durability and resistance to adverse conditions as an environmentally friendly alternative to Portland cement. Based on geopolymer complex concrete, a composition has been established for the innovative technology of additive construction printing using 3D printers [8].

Compared to slag-alkali binders in geopolymer composite concretes, alkali metal cations are totally chemically cemented, that is, they are enclosed in a supramolecular nanostructure and cannot migrate to the surface and enter into physico-chemical destructive reactions. Consequently, a stable, long-lasting microstructure of the heat-resistant building material is ensured, which is resistant to corrosion and other aggressive external influences.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Due to this characteristic, geopolymer concrete can be reliably used to encapsulate radioactive waste.

Concentrated alkali solutions (NaOH and KOH); sodium, potassium (or mixed) liquid glass are used as the alkaline activator of the optimized geopolymerization process. The kinetic rate of geopolymer reactions is higher if the alkaline activator is a complementary solution of sodium hydroxide, sodium silicate (or potassium silicate). Mechanical crushing (mechanical activation) of fly ash leads not only to a decrease in particle size and an increase in specific surface area, but also to an increase in reactivity. At the molar ratio oxides of silicon (SiO_2): aluminum (Al_2O_3) = 1.77 and 2.20 an amorphous glassy microstructure was found in the geopolymer, and the physico-mechanical strength increased 20-fold, which is explained by the formation of a supramolecular aluminosilicate crosslinked three-dimensional nanostructure [9].

It is established that for technological production of geopolymer composites with a strength of 27-52 MPa, the average size of fly ash microparticles should be about 18 microns, and the ratio of alkaline activator: ash is in the range of 0.48-0.72; the optimal ratio of sodium silicate and sodium hydroxide is 0.8–1.5; the molar concentration of NaOH is from 7.8 to 11.5 mol/liter. The resulting composites are suitable for the manufacture of road surfaces, while carbon dioxide CO_2 emissions are reduced and multi-tonnage waste from thermal power plant waste is efficiently disposed.

The technological characteristics of geopolymers (physical, mechanical and operational) are functionally related to the chemical and mineralogical composition and dispersion of the mineral component, the nature and concentration of the alkaline component, as well as the presence of additives, structural features and other factors. Sufficiently high physical and mechanical characteristics of the geopolymer composite: compressive strength of 65-70 MPa are achieved when the initial raw material composition contains 25% blast furnace slag, 8-10% sodium silicate, 2.5% sodium hydroxide. For geopolymer compositions containing sodium silicate and cured at 80°C, KOH is a more effective alkaline activator than sodium hydroxide. An increase in the dispersion of the aluminosilicate component 1.5 times leads to an increase in strength from 55 to 74 MPa; ash and slag additives, which are introduced into the composition of aluminosilicate kaolin, can reduce the heat treatment time from 5-7 hours to several minutes [10, 11].

Digital technologies of optical and robotic sorting of streams of various waste products make it possible to more selectively extract raw aluminosilicates for subsequent use in the production of geopolymers. Despite the significant advantages of geopolymer composites, they are currently underused as binders in the construction of road transport structures. The main reasons that hinder the technological use of geopolymer binders in the energy-saving

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

transport building industry are: the inconstancy of the chemical and mineralogical composition of alumosilicate artificial raw materials; poor development of regulatory documents, etc.

The physical and mechanical characteristics of geopolymer composites and the areas of their technological use in the road construction of transport buildings depend on the molar ratio of silicon and aluminum components (Si/Al oxides)

■ Si/Al = 1 - energy–saving building materials for the manufacture of ceramic road transport constructions;

■ Si/Al = 2 – building materials for the production of geopolymer concrete with low carbon dioxide emissions during production;

■ Si/Al ≤ 3 are highly efficient materials for additive 3D printing technologies made of geopolymer composites, which are increasingly being used in transport building, including strengthening highway roadways [12-14].

Geopolymer composite binders based on industrial waste: slags and slimes can be effectively used for the installation of upper and lower layers of soil foundations in highways of various transport and operational categories. Assessment of the possibility of high–tech use of secondary multi–tonnage resources – industrial waste – in innovative technologies for strengthening dispersed grounds allows not only to reduce the cost of road building, but at the same time contributes to the effective solution of acute geoecological problems of Bashkortostan [15].

High-quality regulatory building and ensuring long-term operation of trunk and regional highways in low-lying areas where clay and loamy grounds predominate, a distinctive feature of which is a sharp decrease in their physical and mechanical characteristics during waterlogging, is possible only when strengthening the foundations of the roadway with various composite binders. Since large volumes of gravel, crushed stone, etc. are required during the building of the M-12 tall-speed highway, reconstruction of federal highways and infrastructural transport facilities M-5 and M-7 [16], therefore road building will soon be a significant consumer of large-scale technogenic waste.

For example, geopolymer composites based on multi-tonnage industrial waste are used in road construction in the construction of reinforced bases of highways [17]. A technology for using geopolymers to stabilize swelling clay dispersed soils has been developed to improve the physical and mechanical characteristics of the roadway foundations (Figure 4).

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|



Figure 4. Resource-saving use of geopolymer composites in the construction of reinforced bases of the M-12 highway section

Multi-tonnage waste from regional industrial production: sludge, ash and slag waste, metallurgical slags, etc. are similar in chemical composition to natural raw materials, which determines the prospects of using them instead of natural stone materials in the innovative production of building materials for road use. For example, the chemical and mineralogical composition of fly ash includes: silicon oxide (more than 50%), aluminum oxide (20-25%), ferric oxide (5-9%), calcium oxide (2-5%); variations in the content of oxides are related to the source of the deposit of burnt coal, incineration technology, etc. The rather low hydraulic activity of fly ash is enhanced by the addition of lime [18], which, along with a high specific surface area, is the reason for the appearance of astringent properties.

However, currently, manufacturers of highway building materials are not sufficiently using the secondary resource potential of multi-tonnage industrial waste in manufacturing technologies for geopolymer composites for road use. Therefore, due to a number of economic, technological and other reasons, non-recyclable waste has been placed in storage dumps for decades. An innovative trend is a systematic approach to recycling Russia's secondary waste by increasing resource–saving recycling, which will allow using up to 50% of industrial raw materials in road construction by 2030. The reuse of local industrial waste resources reduces the cost of producing road building materials for high-speed federal highways by 15-35%.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Geopolymer composite materials are not inferior in physical and mechanical characteristics to Portland cement concretes due to the formation of strong branched macro chains -O–Si–O–Al–O–; are not susceptible to oxidation, are nonflammable, and have high thermal and radiation resistance. By varying the ratios of raw materials and adjusting the synthesis conditions of geopolymer binders, the production of composite materials based on aluminosilicate lime-slag binders has been advanced, which are in demand in the construction of transport infrastructure facilities with a variety of necessary characteristics: low shrinkage deformations, the ability to adjust the hardening of coatings, etc. A number of infrastructure projects for the introduction of artificial intelligence [19] have implemented the use of geopolymer composites in the building of road transport facilities.

The demand use of unmanned intelligent vehicles [20, 21] can significantly transform the methodology of designing and implementing the construction of road infrastructure facilities using waste-based geopolymers, especially in natural and climatic zones with difficult engineering and geological conditions. To create and sustainably develop the geopolymer building materials industry, it is necessary to accumulate and systematically analyze data on the impact of various factors on technological characteristics. Multicriteria optimization of big data on the parameters of labor costs and resources of geopolymer composites becomes the initial array for algorithms of neural network methods.

The successful implementation of the transport strategy of Russia and the federal network of high-speed highways M-5, M-7 and M-12 in Bashkortostan is associated with comprehensive planning for the development of the economic and logistics infrastructure of the republics and regions between the Volga and the Urals. Transport accessibility allows organizing various types of medical and recreational tourism in the tourist and recreational complexes of Bashkortostan. Russian regions have significant tourist and recreational potential, including landscape natural resources and objects of world and national cultural and historical heritage.

Thus, in conclusion, it can be deduced that the further expansion of the frontier technology of using geopolymer composites makes it possible to progress demanded road building materials with more enhanced physical and mechanical characteristics, and the disposal of multi-tonnage technogenic waste solves topical environmental problems and reduces the carbon footprint.

References

1. Eroshkina N.A., Sadenko S.M. Technology and properties of geopolymer materials for construction purposes. Penza: PGUAS, 2019. 188 p. ISBN 978-5-9282-1647-4. EDN WVYGNN.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

2. Alikina Yu.A., Alekseev A.A., Golubeva O.Y. Geopolymer materials: problems, achievements and prospects. Journal of Applied Chemistry. 2024. V.97. No.2. P.114-131. https://doi.org/10.31857/S0044461824020026 EDN DVMEGO.

3. Ivanova O.V., Glazachev A.O., Pavlov S.Yu. et al.. The demand energy-saving use of geopolymer materials. Modern prospects for the development of the industry builds.: Collection of the 3rd All–Russian Conference. Kursk: Publ. "University book", 2025. P.181-184.EDN VLWANX.

4. Cong P. Cheng Ya. Advances in geopolymer materials // Journal of Traffic and Transportation Engineering. 2021. V.8, No.3. P.283-314. https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.03.004 EDN IULPZG.

5. Ivanova O.V., Khalikov R.M., Latypova Z.B. Energy-saving use of geopolymer composites in building materials science. Problems of development of modern society: Collection of the 10th All-Russian Conference. Kursk: Publ. "University Book", 2025. P.144-147.EDN OYKNXK

6. Delitsyn L.M., Kulumbegov R.V., Popel O.S. et al. Processing of ash and slag waste from coal-fired thermal power plants and extraction of commercial products from the waste. Thermal Engineering. 2025. V.72, No.3. P.203-220. https://doi.org/10.1134/S0040601524700836. EDN BIGRZQ.

7. Kholyanova M.D., Rossokhina A.N. Problems of the introduction of geopolymer binders and materials based on them in construction. Modern technologies in construction. Theory and practice. 2023. V.2. P.239-244. EDN VZOADK.

8. Ivanova O.V., Khalikov R.M., Salov A.S. et al. Technological equipment management for 3D additive printing of building nanocomposites. Nanotechnologies in Construction. 2021; 13(2): 117–123. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-2-117-123. EDN PDLKKY.

9. Nedoseko A.I., Khalikov R.M., Pavlov S.Yu. et al. Supramolecular improvement of the performance characteristics of asphalt-concrete road coverings by structuring additives of functional polymers. Smart composites in construction. 2025. V.6, No.4. P.43-54.https://doi.org/10.52957/2782-1919-2025-6-4-43-54. EDN BGNCBM.

10. Wang H., Zheng Yu., Yu Zh. Influence of ambient relative humidity on the shrinkage strain of engineered geopolymer composites. Materials. 2024. V.17, No.17. P.4321. EDN GGEBXG.

11. Khalikov R.M., Ivanova O.V., Pavlov S.Yu. et al. Energy-saving technologies for the use of geopolymer composites in the construction of transport facilities. Actual problems of science and education: Collection XXXVII Internation. Conf. Moscow: Publ. "Znanie-M", 2025. P.525-530. EDN BDOJEN.

12. Bulanov P.E., Vdovin E.A., Stroganov V.F., et al. Strength characteristics of stabilized soils with geopolymer binders for road construction. Izvestiya KGASU. 2025. No.2(72). P.258-267. EDN ORUYKA.

13. Ricciotti L., Frettoloso C., Franchino R. et al. Geopolymer materials: cutting-edge solutions for sustainable design building. Sustainability. 2025. No.17. P.7483. https://doi.org/10.3390/su17167483

14. Bakunov V.S., Khalikov R.M., Shayakhmetov A.U. et al. Hardening of an alumophosphate composition under heating. Refractories and technical ceramics. 2016. No.3. P.24-27. EDN YKWRCT.

15. Latypova Z.B., Khalikov R.M., Glazachev A.O. et al. Geoecological aspects of the use of lime-containing large-tonnage soda production waste in Bashkortostan. Problems of regional ecology. 2023; 4:68-72. https://doi.org/10.24412/1728-323X-2023-4-68-72. EDN ZFOTOL.

16. Bogushevich S.A., Samuilov V.M., Nevolin D.G. et al. High-speed highway M-12 Moscow – Tyumen: prospects and stages of construction. Innovative transport. 2022; 1(43):3-7. https://doi.org/10.20291/2311-164X-2022-1-3-7. EDN CQPVXF.

17. Khalikov R.M., Ivanova O.V., Pavlov S.Yu. et al. Innovative technologies in the construction of the Dyurtyuli-Achit section of the M-12 federal highway. Trends in the development of science and education. 2024; 108-13:62-65. https://doi.org/10.18411/trnio-04-2024-711. EDN SKRIKH.

18. Suleymanova L.A., Ryabchevsky I.S., Chesnokov I.A. Investigation of factors influencing the physico-mechanical characteristics of geopolymer concrete University Science. 2021. No.2(12). P.68-70. EDN PITZIY.

19. Aristova D.A., Makeeva E.Z., Fedorova O.V. The effects of the introduction of intelligent transport systems. The transport business of Russia. 2022; 1:114-115. EDN FTTQWY.

20. Lipatov M.S., Maksimov Ya.V. Application of new technologies on the example of unmanned vehicles using artificial intelligence. International Journal of Professional Science. 2024. No.3-2. P.6-12. EDN WXBFLT.

21. Ivanova O.V., Pavlov S.Yu., Glazachev A.O. et al. Innovative unmanned vehicle operation technologies in high-speed federal highways. Modern innovations in engineering and technology: Collection of the International Conference. Kursk: Publ. "Univer. book", 2025; P.139-142. EDN XOADRL.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 339.9:656.2(575.2)

Khanov A.A., Surkova A.A. Development of the China–Kyrgyzstan–Uzbekistan transport corridor and its importance for the transit potential of the Kyrgyz republic

Развитие транспортного коридора Китай–Кыргызстан–Узбекистан и его значение для транзитного потенциала Кыргызской республики

Khanov Alikhan Akhmedovich
Student, RUDN University (Moscow)
Surkova (Tinkova) Arina Aleksandrovna
Ph.D., Associate Professor, Department of International Economic Relations
RUND
Ханов Алихан Ахмедович
Студент, RUDN University (Москва)
Суркова (Тинькова) Арина Александровна
к.э.н., доцент кафедры международных экономических отношений
РУНД

Abstract. *The article analyzes the development of the China–Kyrgyzstan–Uzbekistan transport corridor and its possible impact on the position of the Kyrgyz Republic in the regional transportation system. It is shown that the project is important not only as a separate railway line, but also as an element of the formation of a new transport and logistics connectivity in Central Asia. The prerequisites for the implementation of the corridor, the current stage of construction, potential benefits for transit, trade and investment, as well as constraints related to the mountainous terrain, the scale of costs and the need to develop related infrastructure are considered.*

Keywords: *Kyrgyz Republic, China, Uzbekistan, transport corridor, transit, railway infrastructure, Central Asia, logistics system.*

Аннотация. *В статье проанализировано развитие транспортного коридора Китай–Кыргызстан–Узбекистан и его возможное влияние на положение Кыргызской Республики в системе региональных перевозок. Показано, что проект имеет значение не только как отдельная железнодорожная линия, но и как элемент формирования новой транспортно-логистической связности Центральной Азии. Рассмотрены предпосылки реализации коридора, текущий этап строительства, потенциальные выгоды для транзита, торговли и инвестиций, а также ограничения, связанные с горным рельефом, масштабом затрат и необходимостью развития сопутствующей инфраструктуры.*

Ключевые слова: *Кыргызская Республика, Китай, Узбекистан, транспортный коридор, транзит, железнодорожная инфраструктура, Центральная Азия, логистическая система.*

Рецензент: Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент. ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

1. Введение

Для стран Центральной Азии, находящихся внутри материка и не имеющих прямого выхода к морским портам, качество транспортных связей имеет стратегическое значение. В таких условиях дороги, пограничные переходы, терминалы и железнодорожные линии выступают не только элементами инфраструктуры, но и

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published - https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

инструментами включения государства в международные цепочки поставок. Кыргызская Республика обладает выгодным положением между Китаем, Казахстаном, Узбекистаном и Таджикистаном, однако сложный горный рельеф и ограниченность железнодорожной сети долгое время не позволяли в полной мере использовать это преимущество.

Актуальность рассматриваемой темы определяется тем, что коридор Китай–Кыргызстан–Узбекистан может заметно изменить место Кыргызстана в евразийской транспортной системе. После многих лет обсуждений проект получил правовую и политическую основу: 6 июня 2024 г. в Пекине было подписано соглашение о совместном продвижении железной дороги, а затем оно было ратифицировано Кыргызской Республикой Законом от 27 июня 2024 г. № 107 [1]. Это позволяет рассматривать проект уже не как перспективную идею, а как инфраструктурную инициативу, перешедшую к практической реализации.

Цель статьи состоит в оценке значения транспортного коридора Китай–Кыргызстан–Узбекистан для раскрытия транзитного потенциала Кыргызской Республики. Для достижения данной цели в работе рассматриваются предпосылки формирования маршрута, современное состояние проекта, ожидаемые экономические результаты, а также факторы, которые могут ограничить эффект от его реализации.

2. Предпосылки формирования коридора

Под транзитным потенциалом государства в данной статье понимается совокупность его географических, инфраструктурных, экономических и административных возможностей, позволяющих обслуживать международные грузовые потоки и получать от этого устойчивые выгоды. Для Кыргызстана исходное географическое преимущество очевидно: страна расположена между западными районами Китая и рынками Центральной Азии. Однако само по себе положение на карте не превращает государство в транзитный узел. Для этого необходимы надежные железные дороги, автомобильные трассы, логистические центры, пропускная способность границ и согласованные правила перевозок.

Исторически транспортная система Кыргызстана в большей степени опиралась на автомобильные перевозки. В материалах CAREC страна характеризуется как важное сухопутное звено, соединяющее западный Китай с Узбекистаном и Таджикистаном в рамках коридоров CAREC 1, 3 и 5. Вместе с тем железнодорожная сеть республики остается разрозненной: северный и южный участки фактически не образуют единой внутренней системы [6]. Поэтому существующая инфраструктура пока не позволяет полностью реализовать транзитные возможности страны.

Проектируемая железная дорога Китай–Кыргызстан–Узбекистан должна создать маршрут от китайского Кашгара к узбекскому Андижану через кыргызскую территорию. По данным OECD, трасса предполагает прохождение через Кашгар, перевал Торугарт,

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Джалал-Абад и далее в направлении Андижана; для государств-участников данный проект рассматривается как способ повысить связанность региона [5]. Для Кыргызстана это особенно важно, поскольку страна получает шанс перейти от роли преимущественно автомобильного транзитного пространства к участию в железнодорожных перевозках между Востоком и Западом.

3. Современный этап реализации проекта

Практический запуск проекта произошел в конце 2024 г.: официальное начало строительства железной дороги было объявлено 27 декабря 2024 г. В 2025 г. работы перешли к ключевым объектам на территории Кыргызской Республики. Кабинет Министров КР сообщал о начале строительства тоннеля в Джалал-Абадской области и подчеркивал, что новая линия должна стать важным связующим элементом между восточными и западными направлениями перевозок [2].

Инженерная сложность проекта обусловлена прежде всего природно-географическими условиями Кыргызстана. Значительная часть трассы проходит по горным районам, что требует строительства большого количества искусственных сооружений. Согласно официальным материалам Кабинета Министров КР, длина кыргызского участка превышает 300 км, инвестиции оценивались в 4,7 млрд долл. США, а к строительным работам планировалось привлечь более 20 тыс. человек. Проект включает 46 мостов суммарной протяженностью около 120 км и 27 тоннелей; на мосты и тоннели приходится примерно 40 % трассы [2].

В последующих сообщениях правительства Кыргызстана отмечалось, что строительные работы развернуты по всей длине кыргызского участка, который составляет около 304 км [3]. Позднее маршрут был конкретизирован как направление «Торугарт – Арпа – Кош-Добо – Макмал – Джалал-Абад» протяженностью 304,94 км [8]. Китайская сторона связывает проект с инициативой «Пояс и путь»: в сообщении Государственного совета КНР указывалась расчетная скорость движения 120 км/ч и отмечалось, что новый маршрут способен сократить время доставки грузов между Китаем и Европой примерно на одну неделю [4].

4. Значение для транзитного потенциала Кыргызской Республики

Ключевая роль коридора для Кыргызстана заключается в том, что он способен придать практическое экономическое содержание выгодному географическому положению страны. Железнодорожная линия формирует прямую инфраструктурную связь с Китаем и Узбекистаном, а через узбекскую транспортную систему открывает дальнейшие направления в Центральную Азию, на Ближний Восток, в Южный Кавказ, Турцию и Европу.

Во-первых, проект повышает уровень транспортной связанности страны. Разделенность железнодорожной сети ограничивает возможности как внутреннего сообщения, так и международного транзита. Новый участок может стать основой для

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

формирования логистических узлов и усиления экономической роли Джалал-Абада, Нарына и прилегающих территорий. Это важно не только для обслуживания иностранных грузопотоков, но и для более удобного вывоза продукции кыргызских предприятий на внешние рынки.

Во-вторых, коридор создает предпосылки для роста доходов от транзита и смежных сервисов. Эффект от транспортного проекта не ограничивается платой за перевозку грузов. Он включает развитие складских мощностей, терминальной обработки, таможенно-брокерских услуг, ремонта подвижного состава, страхования, сервисных зон и иных видов деловой активности. Для Кыргызстана это может стать одним из направлений диверсификации экономики и расширения занятости в регионах.

Во-третьих, новая железная дорога может усилить инвестиционную привлекательность республики. Для инвестора важны не только налоговые условия и стоимость рабочей силы, но и возможность быстро доставлять сырье, комплектующие и готовую продукцию. Национальное агентство по инвестициям при Президенте КР отмечало, что в 2024 г. Китай стал крупнейшим инвестором в экономику Кыргызстана, вложив 286,5 млн долл. США, а объем двусторонней торговли достиг 22,71 млрд долл. США [7]. На этом фоне железная дорога может стать инфраструктурной основой для дальнейшего торгово-инвестиционного взаимодействия.

В-четвертых, развитие коридора усиливает региональную интеграцию. У Кыргызстана, Китая и Узбекистана появляется общий инфраструктурный интерес, который требует согласования технических, таможенных и тарифных решений. OECD обращает внимание на то, что интерес Кыргызстана к Транскаспийскому транспортному коридору связан с возможностью обслуживания потоков между Китаем и Европейским союзом, а линия Китай–Кыргызстан–Узбекистан может стать дополнительным направлением для китайских грузов [5].

Таблица 1

Основные направления влияния коридора на транзитный потенциал Кыргызстана

Направление влияния	Проявление эффекта	Практическое значение для Кыргызской Республики
Инфраструктурное	Формирование железнодорожного выхода к Китаю и Узбекистану	Снижение разобщенности сети и расширение вариантов международного транзита
Экономическое	Развитие перевозок, терминальной обработки, складов и сервисных услуг	Новые доходы, рабочие места и дополнительные импульсы для регионального развития
Инвестиционное	Улучшение доступа предприятий к внешним рынкам	Повышение привлекательности производственных, торговых и логистических проектов
Стратегическое	Встраивание в сухопутные маршруты между Востоком и Западом	Укрепление роли страны как связующего звена в евразийских перевозках

Источник: составлено автором с опорой на материалы Кабинета Министров Кыргызской Республики, OECD, CAREC и Государственного совета КНР [2; 4; 5; 6].

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

5. Проблемы и ограничения реализации проекта

При всей значимости проекта его нельзя воспринимать как автоматический механизм экономического роста. Железная дорога создает инфраструктурную основу, но конечный результат будет зависеть от того, насколько последовательно Кыргызстан дополнит строительство институциональными, таможенными и логистическими преобразованиями.

Первое ограничение связано с высокой капиталоемкостью и технической сложностью работ. Большая доля тоннелей и мостов увеличивает стоимость строительства и повышает вероятность пересмотра сроков и бюджета. Второй риск относится к финансовой устойчивости. OECD указывает, что железная дорога имеет значительный потенциал, однако одновременно может усилить долговую нагрузку страны [5]. В связи с этим особое значение приобретают прозрачность финансовой модели, контроль расходов и приемлемые условия привлечения средств.

Третья проблема заключается в конкуренции транспортных маршрутов. Грузоотправители выбирают направление не только по расстоянию, но и по совокупной стоимости, скорости, надежности, безопасности, частоте отправок и предсказуемости процедур. Поэтому для полноценного эффекта от железной дороги необходимо развивать терминалы, склады, цифровые сервисы оформления грузов и понятную тарифную систему.

Четвертое ограничение связано с качеством административного сопровождения транзита. CAREC фиксирует улучшение отдельных показателей автомобильных перевозок в Кыргызстане, включая сокращение времени прохождения пограничных пунктов, однако вопросы стоимости и стабильности процедур сохраняют значение [6]. Следовательно, инфраструктурное строительство должно сопровождаться модернизацией таможенного и пограничного администрирования.

6. Заключение

Транспортный коридор Китай–Кыргызстан–Узбекистан относится к числу наиболее важных инфраструктурных проектов для Кыргызской Республики. Его значение состоит в том, что он способен преобразовать выгодное географическое положение страны в конкретный экономический ресурс. Проект открывает перспективы прямого железнодорожного сообщения с Китаем и Узбекистаном, расширения транзитной функции, развития логистических услуг и повышения инвестиционной привлекательности.

В то же время положительный эффект от коридора не гарантирован заранее. Высокая стоимость строительства, горный характер трассы, финансовые риски, конкуренция альтернативных маршрутов и необходимость административных реформ требуют продуманной государственной политики. Чтобы максимально использовать

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

транзитный потенциал, Кыргызстану необходимо развивать логистические центры, внедрять цифровые таможенные процедуры, обеспечивать прозрачность тарифов и увязывать железнодорожный проект с программами регионального развития.

Таким образом, коридор Китай–Кыргызстан–Узбекистан может стать для Кыргызской Республики важным фактором экономической модернизации и регионального сближения. Однако долгосрочный успех проекта будет зависеть от того, сумеет ли страна превратить строительство отдельной железнодорожной линии в развитие полноценного международного транспортно-логистического коридора.

References

1. Кыргызская Республика. Закон от 27 июня 2024 г. № 107 «О ратификации Соглашения между Правительством Китайской Народной Республики, Кабинетом Министров Кыргызской Республики и Правительством Республики Узбекистан о сотрудничестве в совместном продвижении проекта железной дороги “Китай–Кыргызстан–Узбекистан”, подписанного 6 июня 2024 года в городе Пекин» [Электронный ресурс]. – URL: https://cbd.minjust.gov.kg/4-5348/edition/11441/ru (дата обращения: 10.05.2026).

2. Зампред Кабмина Бакыт Торобаев принял участие в церемонии начала строительства ключевых объектов железной дороги Китай–Кыргызстан–Узбекистан [Электронный ресурс] // Кабинет Министров Кыргызской Республики. – 2025. – 29 апр. – URL: https://www.gov.kg/ru/post/s/25200-minkab-toragasynyn-orun-basary-bakyt-torobaev-kytai-kyrgyzstan-ozbekstan-temir-zolunun-negizgi-obektterinin-kurulusun-bastoo-azemine-katysty (дата обращения: 10.05.2026).

3. Бакыт Торобаев: По всей протяженности железной дороги Китай–Кыргызстан–Узбекистан на территории Кыргызстана начались полномасштабные строительные работы [Электронный ресурс] // Кабинет Министров Кыргызской Республики. – 2025. – 30 июня. – URL: https://www.gov.kg/ru/post/s/25407-minkab-toragasynyn-orun-basary-bakyt-torobaev-kyrgyzstandyn-aimagyndagy-kytai-kyrgyzstan-ozbekstan-temir-zolunun-bardyk-304-cakyrymynda-toluk-kurulus-isteri-bastaldy (дата обращения: 10.05.2026).

4. China-Kyrgyzstan-Uzbekistan railway set to enhance regional connectivity [Electronic resource] // The State Council of the People’s Republic of China. – 2024. – Dec. 28. – URL: https://english.www.gov.cn/news/202412/28/content_WS676f37fcc6d0868f4e8ee532.html (accessed: 10.05.2026).

5. OECD. The Kyrgyz Republic: Enhancing the Competitiveness of the Trans-Caspian Transport Corridor in Central Asia [Electronic resource]. – Paris : OECD Publishing,

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

2025. – URL: https://www.oecd.org/en/publications/enhancing-the-competitiveness-of-the-trans-caspian-transport-corridor-in-central-asia_f261e7fa-en/full-report/the-kyrgyz-republic_031d8e19.html (accessed: 10.05.2026).

6. Kyrgyz Republic [Electronic resource] // CAREC Corridor Performance Measurement and Monitoring. 2023 Report. – URL: https://cpmm.carecprogram.org/2023-report/kyrgyz-republic/ (accessed: 10.05.2026).

7. Диалог порождает решение: Кыргызстан и Китай расширяют инвестиционное сотрудничество [Электронный ресурс] // Национальное агентство по инвестициям при Президенте Кыргызской Республики. – 2025. – 31 июля. – URL: https://invest.gov.kg/ru/news/16977 (дата обращения: 10.05.2026).

8. Председатель Кабинета Министров Адылбек Касымалиев ознакомился с ходом строительства тоннеля на участке железной дороги Китай–Кыргызстан–Узбекистан [Электронный ресурс] // Кабинет Министров Кыргызской Республики. – 2025. – 5 дек. – URL: https://www.gov.kg/ru/post/s/25850-minkab-toragasy-adylbek-kasymaliev-kytai-kyrgyzstan-ozbekstan-temir-zolunun-tilkesindegi-tunneldin-kurulusunun-zurusu-menen-taanysty (дата обращения: 10.05.2026).

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 656.615519.2

Makhova N.B., Grunina A.V., Krasnoperova U.P. Modelling of ship and wagon flows using the Poisson method

Моделирование потоков судов и вагонов методом Пуассона

Makhova Natalia Borisovna,
PhD, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics,
Russian University of Transport, Russia, Moscow
Grunina Alena Vladimirovna,
Student, Russian University of Transport, Russia, Moscow
Krasnoperova Ulyana Pavlovna,
Student, Russian University of Transport, Russia, Moscow
Махова Наталья Борисовна,
к.т.н., доцент кафедры “Высшая математика, Российский университет транспорта, Россия, г. Москва
Грунина Алена Владимировна,
студент, Российский университет транспорта, Россия, г. Москва
Красноперова Ульяна Павловна
студент, Российский университет транспорта, Россия, г. Москва

Abstract. *The article discusses a probabilistic approach to modelling traffic flows in a seaport. The aim of the study is to develop a methodology for quantifying the share of cargo transshipped via the direct option (ship–wagon) based on the Poisson nature of input flows. Analytical expressions are derived for calculating the probability of the simultaneous presence of ships and wagons at the berth, as well as the share of direct transshipment. Numerical examples demonstrating the practical applicability of the model are given. A sensitivity analysis of parameters is performed, and recommendations for synchronising flow intensities to optimise warehouse costs are provided. The proposed methodology minimises transport downtime and increases the turnover of port facilities*

Keywords: *port, direct transshipment, Poisson distribution, traffic flow, modelling, cargo handling, ship, wagon*

Аннотация. *В статье рассматривается вероятностный подход к моделированию транспортных потоков в морском порту. Целью исследования является разработка методики количественной оценки доли груза, перегружаемого по прямому варианту (судно–вагон), на основе пуассоновского характера входных потоков. Выведены аналитические выражения для расчёта вероятности одновременного наличия судов и вагонов у причала, а также доли прямой перевалки. Приведены численные примеры, демонстрирующие практическую применимость модели. Выполнен анализ чувствительности параметров и даны рекомендации по синхронизации интенсивностей потоков для оптимизации складских издержек. Предложенная методика позволяет минимизировать простои транспорта и повысить оборачиваемость портовых мощностей.*

Ключевые слова: *порт, прямой вариант перевалки, закон Пуассона, транспортный поток, моделирование, грузопереработка, судно, вагон*

Рецензент: Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент. ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

В современных транспортно-логистических комплексах ключевым фактором эффективности является синхронизация работы водного (суда) и наземного (железнодорожные вагоны, автомобили) транспорта. Простой одного из видов

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

транспорта в ожидании другого приводит к значительным экономическим потерям: простой судна в порту может достигать 30 % от общего времени оборота, а простой вагонов — до 25 % от времени доставки груза.

Особый интерес представляет прямой вариант перевалки — перегрузка груза непосредственно с судна на вагон, минуя склад. Однако логистические системы, такие как порты и железнодорожные узлы, работают в условиях высокой неопределённости. В силу сложности процессов движения не всегда возможно с точностью до минуты указать, когда придёт судно или состав, но, как правило, известна средняя интенсивность движения.

Метод Пуассона можно применять для систем, где события происходят независимо и случайно во времени. Логистические системы, такие как железнодорожные узлы и порты, работают в условиях неопределённости. Поэтому одной из главных задач инженера-проектировщика является определение пропускной способности транспортного узла. Чтобы понять, насколько логистический терминал справится с нагрузкой, необходимо использовать математические модели, способные описать случайный характер прибытия транспорта.

В морской логистике метод Пуассона используется для проектирования причального фронта, например, в случае, когда причалов меньше, чем ожидаемое количество прибывающих судов. Для железнодорожного транспорта специфика применения закона Пуассона заключается в возможности случайных задержек поездов в пути. Например, рассматривается задача прибытия на станцию большего числа вагонов, чем она может переработать.

Таким образом, метод Пуассона является своего рода мостиком между массой случайных прибытий и строгим планированием ресурсов, фундаментом для расчёта пропускной способности любого транспортного узла.

Целью данной работы является разработка методики количественной оценки доли груза, перегружаемого по прямому варианту, на основе пуассоновского характера входных потоков судов и вагонов.

Для достижения цели решаются следующие задачи:

- обоснование применимости закона Пуассона к транспортным потокам в порту;
- вывод аналитических выражений для расчёта вероятностей наличия судов и вагонов;
- расчёт доли прямой перевалки и объёмов грузопереработки;
- апробация методики на численных примерах;
- формулировка практических рекомендаций.

2 Теоретические основы моделирования

2.1 Применение закона Пуассона к транспортным потокам

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Закон Пуассона описывает вероятность возникновения n событий за промежуток времени τ при известной интенсивности потока λ

$$P_n(\tau) = \frac{(\lambda\tau)^n}{n!} e^{-\lambda\tau} (1)$$

где:

- $P_{n(\tau)}$ — вероятность того, что за время τ произойдёт ровно n событий;
- λ — интенсивность потока (среднее число событий в единицу времени);
- τ — рассматриваемый интервал времени.

Ключевые свойства распределения:

- математическое ожидание числа событий:$M[X] = \lambda\tau$
- дисперсия:$D[X] = \lambda\tau$
- распределение асимметрично, особенно при малых λ

Применимость закона Пуассона к транспортным потокам в портовых условиях обоснована, если:

- отсутствует жёсткое расписание;
- суда следуют из разных портов отправления;
- погодные и навигационные условия вносят случайные задержки.

Для железнодорожных вагонов пуассоновская модель также применима при среднесуточной неравномерности, однако при жёстком графике движения поездов может потребоваться использование более сложных моделей.

2.2 Математическая модель перевалки грузов

В основе расчётов лежит потоковый граф, где рассматриваются три ключевые связи (варианты перегрузки):

- связь 1–3 (прямой вариант): «судно–вагон»;
- связь 1–2: «судно–склад»;
- связь 2–3: «склад–вагон».

Объём груза, перегружаемого по прямому варианту (Q_{1-3}), определяется вероятностным методом и зависит от одновременного наличия судна и принимающего транспорта у фронта погрузки.

2.3 Основные вероятностные параметры

Общая формула для расчета максимально возможного объёма перевалки по прямому варианту (судно-вагон) имеет вид:

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

$$Q_{1-3} = P_c^* \cdot P_в^* \cdot P_П^* \cdot P_M^* \cdot П_{1-3} (2)$$

Где:

–P_c^* — вероятность наличия судов у причала;

–$P_в^*$ — вероятность наличия вагонов у причала;

–$P_П^*$ — вероятность отсутствия необходимости складирования для технологических операций;

–P_M^* — вероятность безотказной работы ПРМ;

–$П_{1-3}$ — перерабатывающая способность грузового фронта по связи «судно-вагон».

Ключевым моментом является то, что P_c и P_B рассчитываются с учётом того, что транспорт прибывает по закону Пуассона.

Рассмотрим несколько примеров применения описанных выше формул для решения практических транспортных задач. Это позволит увидеть, как полученные вероятностные модели работают с реальными цифрами, и понять их ограничения:

3. Пример задачи моделирования потоков судов и вагонов в порту с расчётом прямого варианта перевалки грузов на основе закона Пуассона.

Для расчёта необходимы следующие параметры:

–λ_c — интенсивность прибытия судов (судов/сутки);

–$\lambda_в$— интенсивность прибытия вагонов (вагонов/сутки);

–$P_с$— вероятность наличия судна у причала;

–$P_в$— вероятность наличия вагона у погрузочного фронта;

–$П_{св}$— перерабатывающая способность грузового фронта по связи «судно–вагон» (т/час);

–T— рассматриваемый период времени (обычно сутки);

–Q — общий объём грузопереработки (т).

3.1 Расчёт вероятностей наличия транспорта у причала

Вероятность наличия судна у причала ($P_с$):

$$P_с = 1 - P_0(\tau), (3)$$

где $P_0(\tau)$ — вероятность того, что за сутки не прибудет ни одного судна:

$$P_0(\tau) = e^{-\lambda_c \tau}. (4)$$

Тогда:

$$P_с = 1 - e^{-\lambda_c \tau}. (5)$$

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Аналогично для вагонов:

$$P_{\text{в}} = 1 - e^{-\lambda_{\text{в}}\tau}. (6)$$

3.2 Расчёт доли груза по прямому варианту

Доля грузопереработки по прямому варианту (η) определяется как произведение вероятностей одновременного присутствия судна и вагона у причала:

$$\eta = P_{\text{с}} \cdot P_{\text{в}} = \left(1 - e^{-\lambda_c \tau}\right) \cdot \left(1 - e^{-\lambda_{\text{в}}\tau}\right). (7)$$

3.3 Расчёт объёма перевалки по прямому варианту

Объём груза, перегружаемого напрямую (без складирования), рассчитывается по формуле:

$$Q_{\text{пр}} = \eta \cdot Q = \left(1 - e^{-\lambda_c \tau}\right) \cdot \left(1 - e^{-\lambda_{\text{в}}\tau}\right) \cdot Q. (8)$$

Объём груза, идущего через склад:

$$Q_{\text{скл}} = Q - Q_{\text{пр}}. (9)$$

3.4 Расчётный суточный объём грузопереработки

Общий суточный объём грузопереработки с учётом всех вариантов перевалки:

$$Q_{\text{сут}} = Q_{\text{пр}} + 2 \cdot Q_{\text{скл}}, (10)$$

где коэффициент 2 учитывает двойную перевалку через склад (выгрузка + погрузка).

3.5 Пример расчёта № 1:

Исходные данные:

$$\lambda_c = 2 \text{ судна/сутки}$$
$$\lambda_{\text{в}} = 5 \text{ вагонов/сутки}$$
$$Q = 5000 \text{ т/сутки;}$$
$$\tau = 1 \text{ сутки}$$

Шаг 1. Рассчитываем вероятности:

$$P_{\text{с}} = 1 - e^{-2 \cdot 1} = 1 - e^{-2} \approx 1 - 0{,}135 = 0{,}865$$
$$P_{\text{в}} = 1 - e^{-5 \cdot 1} = 1 - e^{-5} \approx 1 - 0{,}007 = 0{,}993$$

Шаг 2. Доля прямого варианта:

$$\eta = 0{,}865 \cdot 0{,}993 \approx 0{,}859.$$

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Шаг 3. Объём прямой перевалки:

$$Q_{\text{пр}} = 0{,}859 \cdot 5000 \approx 4295 \text{ т.}$$

Шаг 4. Объём через склад:

$$Q_{\text{скл}} = 5000 - 4295 = 705 \text{ т.}$$

Шаг 5. Суточный объём грузопереработки:

$$Q_{\text{сут}} = 4295 + 2 \cdot 705 = 5705 \text{ т.}$$

3.5.1. Практические рекомендации

1. Оптимизация параметров: для увеличения доли прямой перевалки необходимо синхронизировать $\lambda_{\text{с}}$ и $\lambda_{\text{в}}$, добиваясь их близости.
2. Резервирование мощностей: учитывать дисперсию пуассоновского потока $(D[X] = \lambda\tau)$ при планировании ресурсов.
3. Имитационное моделирование: для сложных случаев рекомендуется использовать дискретно-событийные модели, учитывающие:
   - время стоянки транспорта;
   - производительность ПРМ;
   - графики движения судов и поездов;
   - ограничения по вместимости причалов и путей.
4. Контроль неравномерности: анализировать коэффициенты вариации для выявления пиковых нагрузок.

3.5.2 Ограничения модели

- предположение о пуассоновском характере потоков (может не выполняться при жёстких графиках);
- не учитываются задержки из-за погодных условий или технических неисправностей;
- упрощённое описание перерабатывающей способности (постоянная $\Pi_{\text{св}}$).

4. Пример № 2. Расчёт доли прямой перевалки

Условие:

$$\lambda_c = 2 \text{ судна/сутки;}$$

$$\lambda_{\text{в}} = 4 \text{ вагона/сутки;}$$

$$\text{общий объём грузопереработки } Q = 6000 \text{ т/сутки.}$$

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Найти объём груза, перегружаемого по прямому варианту.

Решение:

1. Вероятность наличия судна у причала:

$$P_c = 1 - e^{-\lambda_c \tau} = 1 - e^{-2} \approx 1 - 0{,}135 = 0{,}865.$$

2. Вероятность наличия вагона у фронта:

$$P_{\text{в}} = 1 - e^{-\lambda_{\text{в}} \tau} = 1 - e^{-4} \approx 1 - 0{,}018 = 0{,}982.$$

3. Доля прямой перевалки:

$$\eta = P_c \cdot P_{\text{в}} = 0{,}865 \cdot 0{,}982 \approx 0{,}849.$$

4. Объём прямой перевалки:

$$Q_{\text{пр}} = \eta \cdot Q = 0{,}849 \cdot 6000 \approx 5094\text{т}.$$

5. Объём через склад:

$$Q_{\text{скл}} = 6000 - 5094 = 906\text{т}.$$

6. Суточный объём грузопереработки:

$$Q_{\text{сут}} = Q_{\text{пр}} + 2 \cdot Q_{\text{скл}} = 5094 + 2 \cdot 906 = 6906\text{т}.$$

5. Пример № 3. Оптимизация работы порта

Условие: сейчас в порт прибывает 4 судна в сутки, а вагонов — 6 в сутки. Руководство хочет увеличить долю прямой перевалки до 90 %, но при этом снизить нагрузку на транспортный узел. Как нужно изменить интенсивность прибытия судов или вагонов?

Решение:

Исходные условия:

$$P_c = 1 - e^{-4} \approx 0{,}982,$$
$$P_{\text{в}} = 1 - e^{-6} \approx 0{,}998,$$
$$\eta = 0{,}982 \cdot 0{,}998 \approx 0{,}980.$$

Уже превышает 90 %, значит, можно снизить нагрузку.

Вариант 1: уменьшить λ_c:

Пусть $\lambda_c = 1{,}5$, тогда:

$$P_c = 1 - e^{-1{,}5} \approx 1 - 0{,}223 = 0{,}777,$$
$$\eta = 0{,}777 \cdot 0{,}998 \approx 0{,}775 < 0{,}9.$$

Не подходит.

Вариант 2: уменьшить $\lambda_{\text{в}}$ до 3:

$$P_{\text{в}} = 1 - e^{-3} \approx 1 - 0{,}050 = 0{,}950,$$
$$\eta = 0{,}982 \cdot 0{,}950 \approx 0{,}933 > 0{,}9.$$

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Подходит.

Вывод: можно снизить интенсивность прибытия вагонов с 6 до 3 в сутки — доля прямой перевалки останется выше 90 %.

6. Заключение

Математическое моделирование транспортных потоков с использованием закона Пуассона позволяет:

- Количественно оценить вероятность наличия судов и вагонов одновременно у причала.
- Обоснованно рассчитать оптимальную долю прямого варианта перевалки η, которая напрямую влияет на экономическую эффективность порта.
- Спрогнозировать суммарную загрузку погрузочно-разгрузочных машин $(Q_{\text{п}})$, что необходимо для планирования ресурсов.

Приведённые расчёты демонстрируют, что даже при случайном характере прибытия транспорта, используя аппарат теории вероятностей и методологию потоковых графов, можно добиться высокой точности в планировании грузопереработки. Игнорирование вероятностной природы потоков приводит либо к необоснованному завышению мощностей, либо к простоям транспорта и снижению оборачиваемости порта.

References

1. Вентцель Е. С. Теория вероятностей : учебник для вузов / Е. С. Вентцель. — 10-е изд., стер. — Москва : Высшая школа, 2006. — 575 с.
2. Гмурман В. Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике : учебное пособие / В. Е. Гмурман. — 11-е изд., перераб. — Москва : Высшее образование, 2008. — 404 с.
3. Гасников А. В. Введение в математическое моделирование транспортных потоков : учебное пособие / А. В. Гасников [и др.] ; под ред. А. В. Гасникова. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : МЦНМО, 2013. — 340 с.
4. Кузнецов Е. С. Управление транспортными потоками : учебник / Е. С. Кузнецов. — Москва : Транспорт, 2015. — 320 с.
5. Методические указания к лабораторным работам «Измерение и расчёт параметров транспортных потоков» / СибАДИ. — Омск, 2019. — Режим доступа: https://e.lanbook.com/book/149542 (дата обращения: 22.04.2026).
6. Hess M., Kos S., Hess S. Queuing System in Optimization Function of The Port's Bulk Unloading Terminal // Pomorstvo : Scientific Journal of Maritime Research. — 2007. — Vol. 19, No. 2. — P. 89–102.
7. Heitmeyer R. Ship-Track Models Based on Poisson-Distributed Port-Departure Times : Report / Defense Technical Information Center (DTIC). — 2006. — ADA443672. — Режим доступа: https://archive.org/details/DTIC_ADA443672 (дата обращения: 22.04.2026).

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

ENGINEERING APPLICATIONS

UDC 629.7

Akhrameyev V.I., Dadashev F.H., Huseynov N.E., Asadov E.Z. Rapid assessment of flight anomalies based on an intelligent microcontroller network with multifactor integration of flight, weather, and psychophysiological data

Экспресс-оценка лётных аномалий на основе интеллектуальной сети микроконтроллеров с мультифакторной интеграцией лётных, погодных и психофизиологических данных

Akhrameyev Vasily Ivanovich,
PhD, Associate Professor, Department of Autometry and Aviation Automation, Faculty of Aviation Information Technologies, Moscow Institute of Physics and Technology, Zhukovsky
Dadashev Fuad Hasan oglu,
PhD, Senior Researcher, Head of the Artificial Intelligence Technologies Department, National Aviation Academy, Baku
Huseynov Namig Elshadovich,
Leading Software Engineer, Department of Artificial Intelligence Technologies, National Aviation Academy, Baku
Asadov Elnur Zeynal oglu,
Leading Researcher, Department of Artificial Intelligence Technologies, National Aviation Academy, Baku
Ахрамеев Василий Иванович
к.т.н., Доцент кафедры Автометрии и авиационной автоматики факультета ФАЛТ МФТИ, г. Жуковский
Дадашев Фуад Гасан оглы
к.т.н., Старший научный сотрудник, руководитель отдела «Технологии Искусственного интеллекта»,_Национальная Академия Авиации, г. Баку
Гусейнов Намиг Эльшадович
Ведущий инженер-програмист отдела «Технологии Искусственного интеллекта»,_Национальная Академия Авиации, г. Баку
Асадов Эльнур Зейнал оглы
Ведущий научный сотрудник отдела «Технологии Искусственного интеллекта»,_Национальная Академия Авиации, г. Баку

Abstract. *This paper presents the architecture of a distributed intelligent microcontroller network for rapid assessment of flight anomalies based on the multifactorial integration of flight, meteorological, and psychophysiological data.*

The relevance of the study stems from the need for early detection of dangerous deviations in highly dynamic flight conditions, limited decision-making time, and the computational limitations of onboard systems. Unlike traditional approaches, the proposed system simultaneously considers the state of the aircraft, the external environment, and the pilot.

The architecture includes a network of microcontroller nodes that perform local data collection, preprocessing, and aggregation, followed by the transfer of informative features to the decision-making module. A three-stream hybrid model combining lightweight CNN, LSTM-peephole, and Attention-Fusion is used to analyze multichannel data streams, providing a balance between computational efficiency and recognition accuracy. The input space is formed from three groups of parameters: flight characteristics, weather and aerological factors, and pilot psychophysiological indicators, including heart

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

rate, heart rate variability, cognitive load, stress responses, and EMG activity. This approach allows for the identification of both overt and covert predictors of abnormal flight situations.

Experimental testing on a 240-hour dataset of telemetry, meteorological, and biometric data demonstrated a reduction in response time to abnormal events, increased classification accuracy, increased resilience to communication channel degradation, and a reduction in the number of false alarms compared to basic processing schemes. The scientific novelty of this work lies in the development of a distributed microcontroller architecture for unified multifactor express diagnostics. Its practical significance lies in the applicability of this approach to manned aircraft, unmanned systems, and intelligent training systems.

Keywords: *flight anomalies, intelligent microcontroller network, embedded systems, multifactor data integration, psychophysiological monitoring, aviation safety, distributed diagnostics, machine learning.*

Аннотация. *В работе представлена архитектура распределённой интеллектуальной сети микроконтроллеров для экспресс-оценки лётных аномалий на основе мультифакторной интеграции лётных, метеорологических и психофизиологических данных. Актуальность исследования связана с необходимостью раннего выявления опасных отклонений в условиях высокой динамики полёта, ограниченного времени принятия решений и вычислительных ограничений бортовых систем. В отличие от традиционных подходов, предложенная система одновременно учитывает состояние летательного аппарата, внешней среды и пилота.*

Архитектура включает сеть микроконтроллерных узлов, выполняющих локальный сбор, предобработку и агрегацию данных с последующей передачей информативных признаков в модуль принятия решений. Для анализа многоканальных потоков используется трёхпоточная гибридная модель, объединяющая lightweight-CNN, LSTM-peephole и Attention-Fusion, что обеспечивает баланс между вычислительной эффективностью и точностью распознавания.

Входное пространство формируется из трёх групп параметров: лётных характеристик, погодных и аэрологических факторов, а также психофизиологических показателей пилота, включая ЧСС, вариабельность сердечного ритма, когнитивную нагрузку, стрессовые реакции и ЭМГ-активность. Такой подход позволяет выявлять как явные, так и скрытые предикторы аномального развития полётной ситуации.

Экспериментальная проверка на массиве из 240 часов телеметрических, метеорологических и биометрических данных показала сокращение времени реакции на аномальные события, повышение точности классификации, рост устойчивости к деградации каналов связи и снижение количества ложных срабатываний по сравнению с базовыми схемами обработки. Научная новизна работы заключается в разработке распределённой микроконтроллерной архитектуры для единой мультифакторной экспресс-диагностики. Практическая значимость определяется возможностью применения подхода в пилотируемой авиации, беспилотных системах и интеллектуальных тренажёрных комплексах.

Ключевые слова: *лётные аномалии, интеллектуальная сеть микроконтроллеров, встроенные системы, мультифакторная интеграция данных, психофизиологический мониторинг, авиационная безопасность, распределённая диагностика, машинное обучение.*

Рецензент: Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент. ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

Введение

Современные авиационные комплексы, включая пилотируемые воздушные суда и беспилотные летательные аппараты, характеризуются высокой степенью технологической сложности, многоуровневой бортовой архитектурой и постоянным ростом объёма данных, поступающих от распределённых сенсорных подсистем. В процессе полёта формируются многочисленные потоки телеметрической информации, включающие параметры вибрации, температуры, угловых скоростей, ускорений, положения рулевых поверхностей, режимов работы двигательной установки, навигационных характеристик, метеорологических воздействий и, в ряде случаев,

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

показателей психофизиологического состояния пилота или оператора. Совокупный анализ этих данных приобретает принципиальное значение для своевременной оценки безопасности полёта, раннего выявления опасных отклонений и предупреждения развития нештатных ситуаций.

В классических системах мониторинга и диагностики преобладает централизованный подход, при котором данные от бортовых датчиков передаются по каналам связи на центральный вычислительный модуль или наземный пункт управления, где и осуществляется их последующая обработка. Несмотря на широкое распространение такого подхода, он имеет ряд существенных ограничений, особенно в задачах оперативной экспресс-оценки лётных аномалий. Во-первых, передача больших объёмов телеметрии и их централизованная обработка неизбежно приводят к задержкам обнаружения аномалий, которые могут составлять от десятков миллисекунд до секунд, что критично для быстропротекающих авиационных процессов. Во-вторых, высокая плотность телеметрического трафика создаёт значительную нагрузку на каналы связи, особенно в условиях ограниченной пропускной способности, нестабильного радиоканала или при работе беспилотных платформ на удалении. В-третьих, традиционные схемы мониторинга, как правило, ориентированы преимущественно на анализ технических параметров летательного аппарата и недостаточно полно учитывают влияние внешней среды и человеческого фактора, хотя именно их сочетание часто определяет развитие опасной ситуации.

Анализ авиационных происшествий и инцидентов показывает, что лётные аномалии редко формируются под воздействием одного изолированного источника. Значительно чаще они являются результатом сложного взаимодействия нескольких факторов, среди которых можно выделить неблагоприятные погодные воздействия, такие как обледенение, турбулентность, вертикальные порывы воздуха и быстро меняющиеся атмосферные условия; высокую психофизиологическую нагрузку на пилота или оператора, проявляющуюся в форме стресса, когнитивного перенапряжения или утомления; скрытые отказы датчиков, исполнительных органов или отдельных элементов бортовой аппаратуры; а также комбинированное влияние внешних факторов на человека и техническую систему управления. Вследствие этого надёжная оценка текущего состояния полёта не может ограничиваться анализом только лётных параметров, а требует мультифакторного подхода, учитывающего взаимосвязь технических, средовых и человеческих переменных.[1]

В современных условиях особую актуальность приобретает построение систем экспресс-детекции, способных выполнять обработку информации непосредственно вблизи источника данных. Такой подход позволяет снизить объём передаваемой телеметрии, уменьшить задержки принятия решений и повысить устойчивость

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

диагностики в условиях ограниченных вычислительных и коммуникационных ресурсов. При этом перспективным направлением является использование распределённых интеллектуальных сетей микроконтроллеров, в которых отдельные вычислительные узлы выполняют первичную фильтрацию, нормализацию, извлечение признаков и локальную оценку состояния по данным конкретных сенсорных подсистем. В результате в центральный модуль поступают не сырые данные, а уже информативные и сжатые диагностические признаки, что делает архитектуру более масштабируемой, отказоустойчивой и пригодной для встроенных авиационных платформ.

С учётом указанных ограничений и вызовов возникает необходимость в разработке мультифакторной модели экспресс-детекции лётных аномалий, которая должна удовлетворять нескольким ключевым требованиям. Такая модель должна обеспечивать локальную обработку данных на борту, эффективно функционировать в условиях невысокой пропускной способности каналов связи, учитывать биометрические и психофизиологические показатели пилота или оператора, а также объединять данные из нескольких разнородных источников в рамках единой аналитической схемы. Только при соблюдении этих условий возможно формирование более полной и реалистичной картины полётной обстановки, пригодной для раннего выявления потенциально опасных состояний.

В данной работе предлагается интеллектуальная распределённая сеть микроконтроллеров, предназначенная для анализа телеметрии вблизи источников данных и обеспечения оперативной мультисенсорной оценки лётных аномалий. В основе предлагаемого подхода лежит идея распределённой предварительной обработки и последующей интеграции трёх основных классов информации: лётных параметров, погодных условий и психофизиологических характеристик пилота или оператора. Такое решение позволяет перейти от традиционного однофакторного или централизованного мониторинга к более гибкой и интеллектуальной архитектуре, ориентированной на раннее распознавание сложных аномалий в реальном времени.

Научный интерес к данной задаче определяется тем, что объединение технических, метеорологических и человеческих факторов в единой распределённой системе анализа открывает возможность повышения точности и скорости диагностики при сохранении вычислительной экономичности. Практическая значимость работы связана с возможностью применения предложенной архитектуры в пилотируемой авиации, беспилотных летательных аппаратах, интеллектуальных авиационных тренажёрах и системах поддержки принятия решений, где особенно важны оперативность, надёжность и устойчивость функционирования в условиях неопределённости.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

1.1. Методы обнаружения лётных аномалий

Задача обнаружения лётных аномалий традиционно решалась с использованием статистических моделей временных рядов, пороговых методов контроля, регрессионного анализа и вероятностных схем оценки отклонений. Эти методы сохраняют практическую ценность благодаря интерпретируемости, однако уступают современным подходам при анализе нелинейных и высокоразмерных последовательностей.

В последние годы в авиационных задачах активно применяются LSTM-сети для моделирования временной динамики систем, а также автоэнкодеры для выявления отклонений по ошибке реконструкции. Однако значительная часть таких решений рассчитана на централизованную обработку или на более мощные вычислительные платформы, чем микроконтроллерный класс устройств.[2,3]

1.2. Погодные факторы и их влияние

Погодные условия являются одним из наиболее существенных внешних источников риска в авиации. К числу наиболее опасных факторов относятся турбулентность, вертикальные сдвиги ветра, обледенение, грозовые фронты, интенсивные осадки и ухудшение видимости. В рамках предлагаемого подхода погодные признаки рассматриваются не как внешний контекст, а как встроенная часть модели аномалии.

1.3. Психофизиологическое состояние пилота

Психофизиологическое состояние пилота является важным компонентом безопасности полёта. В авиационных исследованиях активно используются HRV, частота сердечных сокращений, показатели стресс-реакции и когнитивной нагрузки. Тем не менее такие данные пока значительно чаще применяются в эргономических и тренажёрных исследованиях, чем в составе штатных встроенных систем диагностики.[3,4]

1.4. Edge-вычисления и микроконтроллерные сети

Edge-вычисления позволяют переносить первичную аналитику непосредственно на периферию системы, ближе к источникам данных. Для авиационных приложений это даёт несколько преимуществ: уменьшение потока сырых данных, сокращение времени реакции, повышение устойчивости к потере связи и возможность локального функционирования даже при частичной деградации канала. Поэтому для микроконтроллерных сетей необходимы lightweight-модели, изначально адаптированные под ресурсы MCU.[5]

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

2. Архитектура интеллектуальной микроконтроллерной сети

2.1. Общий подход

Предлагаемая архитектура представляет собой интеллектуальную распределённую сеть микроконтроллеров, в которой вычислительная нагрузка распределена между периферийными узлами, расположенными вблизи источников данных. Сеть включает от 16 до 128 микроконтроллерных узлов, объединённых по mesh-топологии. Каждый узел отвечает за локальный приём данных от своей группы сенсоров, предварительную обработку, извлечение признаков и передачу компактного представления состояния в координирующий уровень.

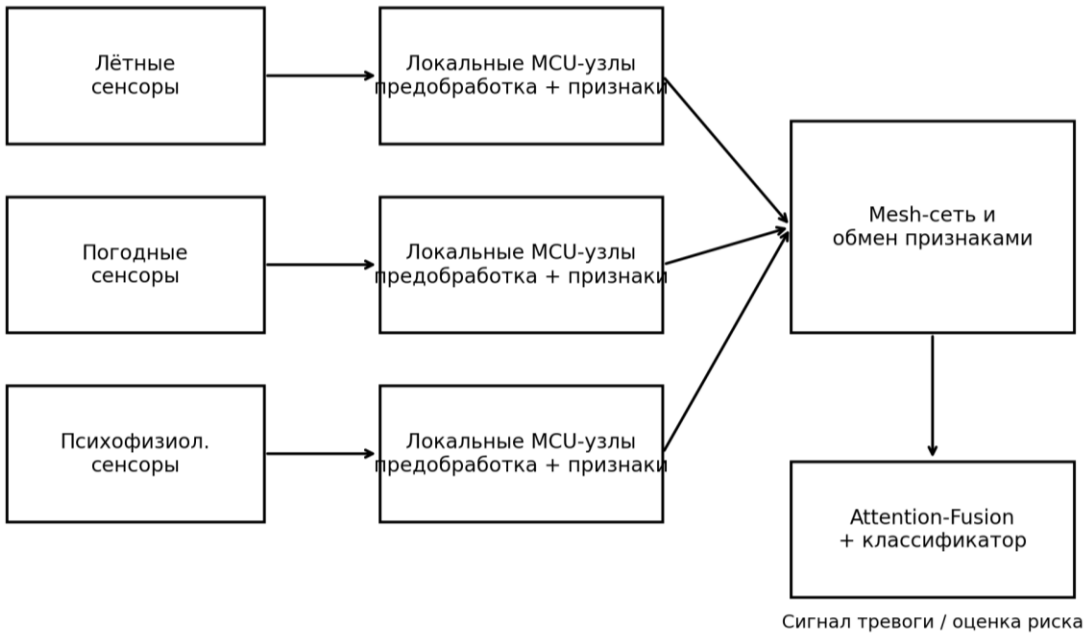


Рис. 1. Общая архитектура интеллектуальной распределённой сети микроконтроллеров для мультифакторной оценки лётных аномалий

Таблица 1.1.

Основные группы входных данных системы

Группа данных	Основные параметры	Назначение
Лётные	угловые скорости, ускорения, вибрации, положения рулевых поверхностей, давление, температура, скорость	оценка динамики платформы и технических отклонений
Погодные	ветер, вертикальные потоки, EDR, риск обледенения, осадки, видимость	учёт внешнего атмосферного контекста
Психофизиологические	ЧСС, rMSSD, SDNN, pNN50, ЭМГ, дыхание, LF/HF	учёт человеческого фактора и операторской нагрузки

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

2.2. Структура микроконтроллерного узла

Каждый узел сети состоит из четырёх основных подсистем: модуля сбора данных, модуля предварительной обработки, модуля локального извлечения признаков и коммуникационного интерфейса. Сначала выполняется временная синхронизация данных и формирование окон анализа фиксированной длины. Затем производится фильтрация шумов, подавление выбросов, нормализация и расчёт базовых статистических характеристик.

После этого узел формирует компактный признаковый вектор, содержащий только диагностически значимую информацию. Помимо этого, на уровне узла вычисляется локальный индекс аномальности, который используется для событийной передачи данных в сеть.[6] Это позволяет не загружать канал непрерывным потоком всех исходных измерений, а передавать только информативные представления и тревожные события.

2.3. Модель мультифакторной интеграции

Алгоритмическое ядро системы построено по трёхпоточной схеме. Каждая ветвь обрабатывает одну из групп данных с помощью специализированного lightweight-модуля. На первом этапе в каждой ветви применяется compact lightweight-CNN, извлекающая локальные временные паттерны. На втором этапе полученные представления подаются в блок LSTM-peephole, предназначенный для моделирования временных зависимостей и накопительного развития опасных состояний.

На третьем этапе результаты трёх ветвей объединяются модулем Attention-Fusion, который адаптивно перераспределяет веса между лётными, погодными и психофизиологическими признаками в зависимости от текущей ситуации. Это делает модель контекстно-зависимой и позволяет избегать жёстко фиксированных коэффициентов вкладов.

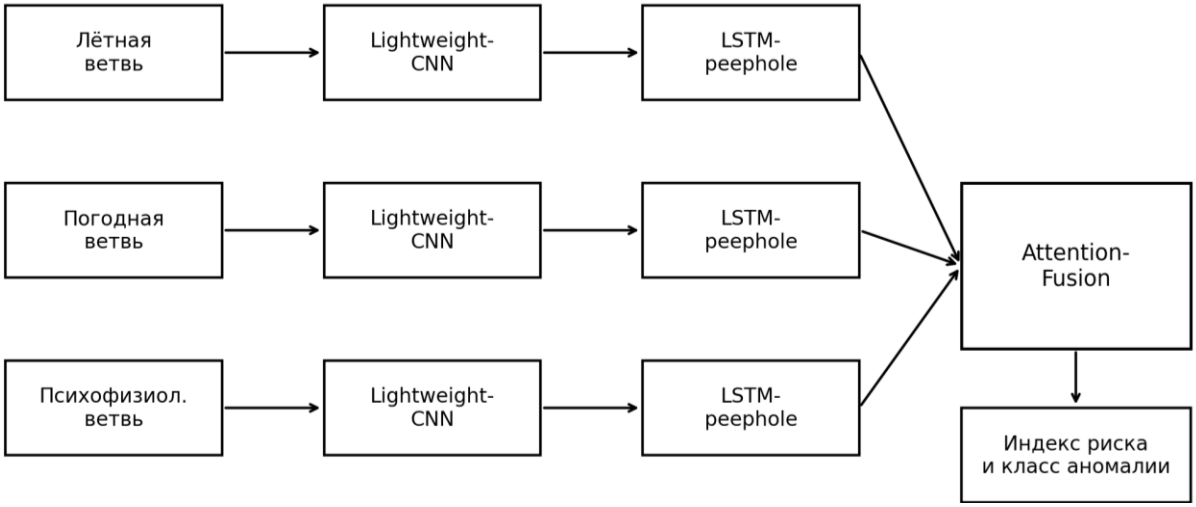


Рис. 2. Трёхпоточная схема обработки: локальное извлечение признаков и их адаптивная интеграция в модуле Attention-Fusion.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

3.1. Данные исследования

Экспериментальный массив включал 240 часов телеметрических записей, содержащих временные ряды лётных параметров, погодные признаки на основе моделей EDR/ICING и биометрические записи операторов. Данные были синхронизированы по временным меткам и разбиты на окна фиксированной длины для последующего анализа.[7]

3.2. Предобработка

На этапе предобработки выполнялись цифровая фильтрация шумов, подавление выбросов, интерполяция кратковременных пропусков, нормализация признаков и расчёт производных статистик и спектральных характеристик. Все признаки приводились к единому масштабу для обеспечения устойчивости обучения.

3.3. Базовые модели сравнения

Для оценки эффективности предложенного подхода результаты сопоставлялись со статистической моделью временных рядов, централизованной LSTM-моделью, автоэнкодером для обнаружения отклонений и облегчённой edge-схемой без attention-fusion.[7,8]

4. Результаты

Экспериментальная проверка показала, что предложенная интеллектуальная сеть микроконтроллеров обеспечивает улучшение сразу по нескольким направлениям. Во-первых, время реакции на аномальное событие сократилось на 38–55% по сравнению с централизованными схемами обработки.

Во-вторых, точность классификации сложных аномалий повысилась на 18–27%.

В-третьих, устойчивость системы к деградации каналов связи выросла на 23 %.

В-четвёртых, число ложных срабатываний снизилось на 31 %.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

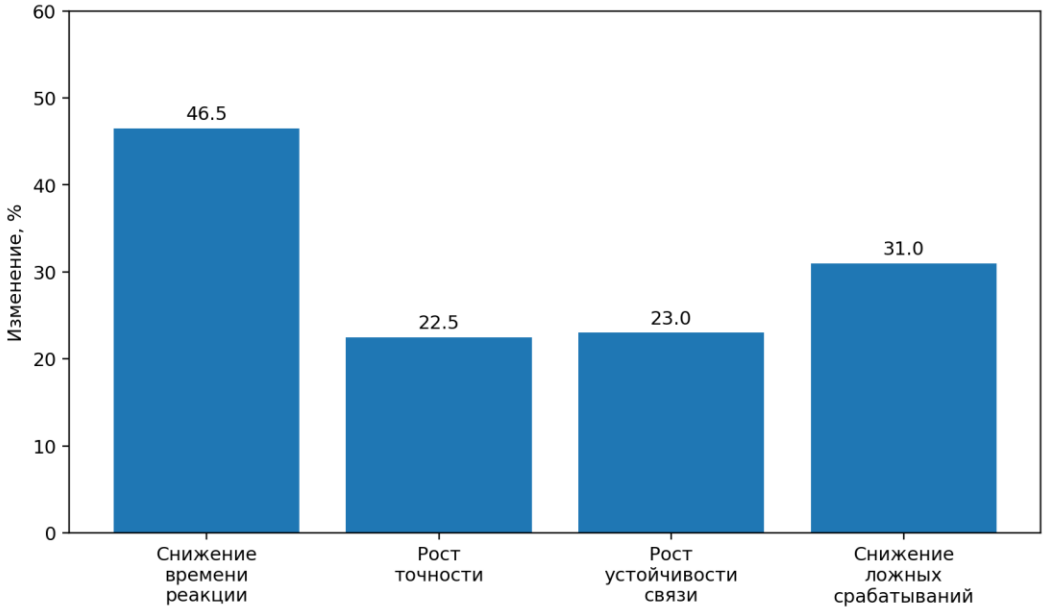


Рис. 3. Сводное сравнение улучшений, полученных для предлагаемой системы относительно базовых схем обработки.

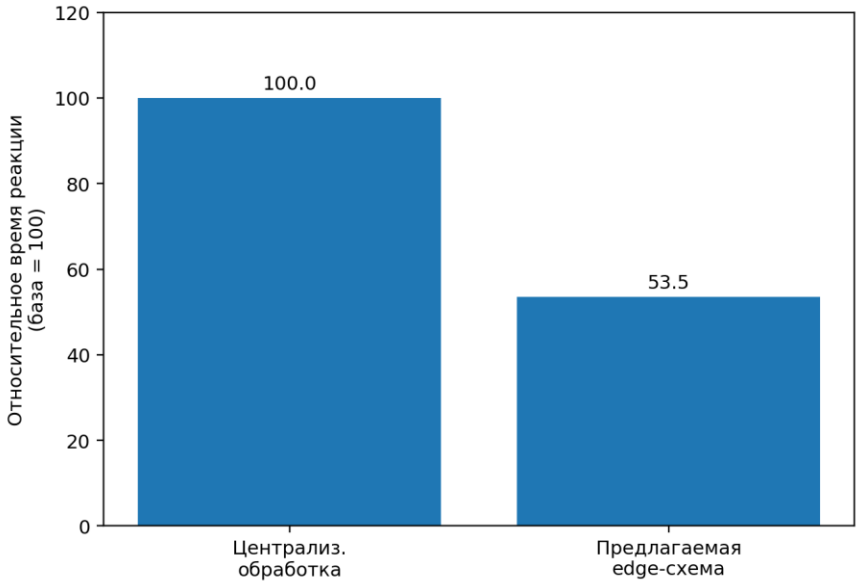


Рис. 4. Относительное время реакции: централизованная обработка и предлагаемая распределённая edge-схема.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

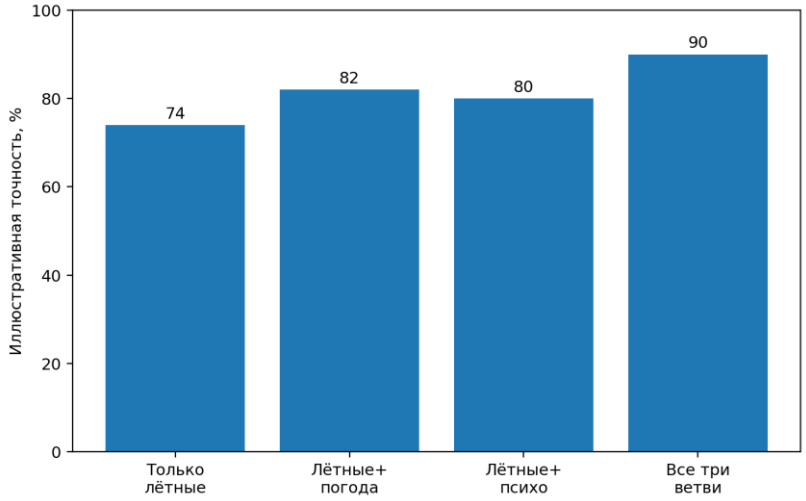


Рис. 5. Иллюстративное ablation-сравнение: вклад различных групп признаков в итоговую точность распознавания.

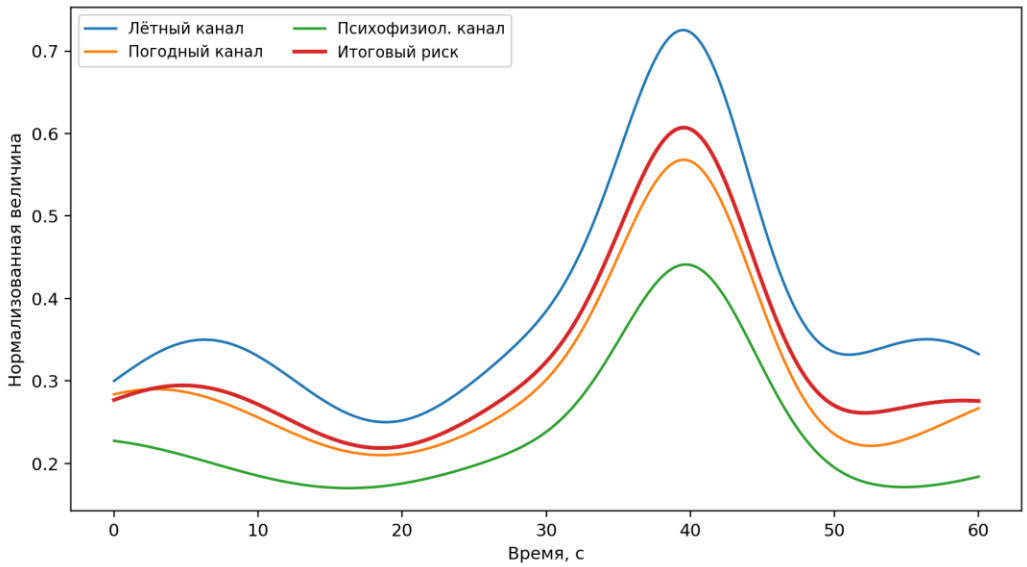


Рис. 6. Пример мультифакторной временной динамики: рост итогового индекса риска при совместном отклонении трёх ветвей.

5. Обсуждение

Полученные результаты показывают, что экспресс-оценка лётных аномалий выигрывает от перехода от централизованного однофакторного подхода к распределённой мультифакторной архитектуре. Основное преимущество предлагаемой системы заключается не только в использовании нейросетевой модели,

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

но и в правильном распределении вычислений между периферийными узлами и уровнем интеграции.

Лётные данные отражают непосредственную динамику платформы, однако без погодного контекста они не всегда позволяют корректно интерпретировать наблюдаемое отклонение. Аналогично, без учёта состояния пилота трудно различать технически обусловленную аномалию и ситуацию, в которой ключевую роль сыграла перегрузка оператора. Введение психофизиологической ветви делает модель чувствительной к человеческому фактору.[9]

К ограничениям исследования следует отнести зависимость от качества синхронизации разнородных потоков, необходимость аккуратной калибровки психофизиологических сенсоров и потенциальную чувствительность модели к изменению профиля платформы или пилота.[10]

6. Заключение

В работе предложена архитектура интеллектуальной распределённой сети микроконтроллеров для экспресс-оценки лётных аномалий на основе мультифакторной интеграции лётных, погодных и психофизиологических данных. В отличие от традиционных централизованных подходов, ориентированных преимущественно на обработку телеметрии в одном вычислительном узле, предложенная система выполняет локальный сбор, предварительную обработку и извлечение информативных признаков непосредственно на периферийных микроконтроллерных узлах. Это позволяет перенести значительную часть вычислительной нагрузки на уровень источников данных, уменьшить объём передаваемой информации и тем самым повысить оперативность функционирования всей диагностической системы.

Показано, что переход к edge-архитектуре с адаптивной fusion-интеграцией разнородных потоков данных позволяет существенно сократить время реакции на аномальные события, повысить точность распознавания сложных и комбинированных аномалий, уменьшить число ложных срабатываний и повысить устойчивость системы к деградации каналов связи. Особенно важным результатом является то, что предлагаемая архитектура обеспечивает более полную и надёжную оценку полётной ситуации за счёт одновременного учёта состояния летательного аппарата, внешней среды и пилота. Введение в контур анализа психофизиологических параметров позволяет учитывать человеческий фактор не как внешний описательный элемент, а как полноценную измеряемую составляющую диагностической модели, тесно связанную с развитием опасных режимов.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Разработанная трёхпоточная гибридная модель, сочетающая lightweight-CNN, LSTM-peephole и механизм adaptive fusion, показала целесообразность применения облегчённых интеллектуальных алгоритмов в распределённых микроконтроллерных системах. Использование lightweight-подхода делает возможным практическое внедрение модели в ресурсно-ограниченную бортовую среду, где критически важны требования к памяти, энергопотреблению, скорости обработки и устойчивости к сетевым ограничениям. Тем самым в работе показано, что современные методы машинного обучения могут быть адаптированы для решения авиационных задач не только на уровне мощных вычислительных станций, но и в рамках распределённой embedded-инфраструктуры.

Практическая значимость исследования заключается в возможности применения предложенного подхода в пилотируемой авиации, беспилотных авиационных системах и интеллектуальных тренажёрных комплексах. Для пилотируемых платформ система может использоваться как дополнительный контур раннего предупреждения и поддержки принятия решений. В беспилотных системах она может повысить устойчивость мониторинга в условиях нестабильной связи и ограниченных вычислительных ресурсов на борту. В тренажёрных комплексах такая архитектура позволяет одновременно оценивать технические параметры сценария и функциональное состояние оператора, что особенно важно при моделировании сложных или стрессовых полётных ситуаций.

С научной точки зрения работа подтверждает перспективность перехода от однофакторных и централизованных схем анализа к мультифакторным распределённым моделям, объединяющим технические, метеорологические и человеческие данные в едином контуре интеллектуальной диагностики. Такой подход расширяет традиционные представления о мониторинге лётных аномалий и формирует основу для построения более гибких, отказоустойчивых и контекстно-зависимых систем авиационной безопасности.

В качестве направлений дальнейших исследований представляется целесообразным проведение аппаратной валидации на конкретных микроконтроллерных платформах, расширение набора анализируемых психофизиологических признаков, исследование механизмов адаптивной перенастройки модели под различные типы летательных аппаратов и режимы эксплуатации, а также изучение возможностей самообучения и онлайновой калибровки системы в реальных условиях полёта. Дополнительный интерес представляет интеграция предложенной архитектуры с системами прогнозирования риска, бортовыми интеллектуальными ассистентами и цифровыми двойниками авиационных платформ.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

References

1. Мемарзаде, М., Мэтьюз, Б., Аврех, И. Неконтролируемое обнаружение аномалий в полетных данных с использованием сверточного вариационного автокодировщика // Аэрокосмическая отрасль. 2020. Том 7, № 8. Статья 115.

2. Ду, В. Обнаружение неисправностей авиационного двигателя с помощью автокодировщика LSTM и механизма самовнимания // Машины. 2024. Том 12, № 12. Статья 879.

3. Ван, П. Выявление и прогнозирование умственной нагрузки пилота с использованием вариабельности сердечного ритма: обзор // Датчики. 2024. Том 24, № 12. Статья 3723.

4. Фейджари, А. Обзор методов обнаружения аномалий в телеметрических данных космических аппаратов // Прикладные науки. 2025. Том 15, № 10. Статья. 5653.

5 Хейдари, С. Миниатюрное машинное обучение и вывод данных на устройстве: обзор // Sensors. 2025. Том 25, № 10. Статья 3191.

6 Джасра, С. К. Сравнительное исследование методов глубокого обучения без учителя для обнаружения аномалий в мониторинге полетных данных // Aerospace. 2025. Том 12, № 7. Статья 645.

7 Рейс, М. Дж. К. С. Обнаружение неисправностей в реальном времени на основе периферии в системах БПЛА // Sensors. 2025. Том 25, № 16. Статья 4944.

8 Ян, В. Исследование идентификации рабочей нагрузки пилота на основе ЭЭГ и мультимодальных психофизиологических характеристик // Aerospace. 2026. Том 13, № 2. Статья. 114.

9 Ву, Ю. Обзор анализа аномального поведения в полете и обнаружения аномалий // Аэрокосмическая отрасль. 2026. Том 13, № 3. Статья 209.

10 Чжай, Дж. Обнаружение аномалий в реальном времени для связи в УКВ гражданской авиации с использованием облегченной модели CNN-LSTM // Аэрокосмическая отрасль. 2026. Том 13, № 3. Статья 270.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 004.056:004.8

Churkin P.Y. Deepfakes and Synthetic Identity in Social Engineering: Deepfake Detection Methods in Audio/Video and Their Impact on Corporate and National Security

Дипфейк и синтетическая идентичность в социальной инженерии: методы обнаружения дипфейков в аудио/видео, влияние на корпоративную и государственную безопасность

Churkin Pavel Yuryevich
Master's Degree Applicant,
National Research University Higher School of Economics (HSE), Moscow
Чуркин Павел Юрьевич
Абитуриент магистратуры НИУ ВШЭ, г. Москва

Abstract. *This article analyzes threats associated with the use of deepfakes and synthetic identity in social engineering. It examines the technological foundations of synthetic content creation and the ways such content is used for fraudulent and destructive purposes. Methods for detecting deepfakes in audio and video data are analyzed, along with the specifics of identifying synthetic identities in the digital environment. The impact of deepfakes on corporate and national security is examined, and the main vulnerabilities of existing protection systems are identified. Particular attention is paid to comprehensive countermeasures, including technical, organizational, and legal mechanisms.*

Keywords: *audio deepfake, video deepfake, synthetic identity, social engineering, artificial intelligence, deepfake detection, generative model, digital identity, neural network, voice cloning*

Аннотация*. Статья посвящена анализу угроз, связанных с использованием дипфейков и синтетической идентичности в социальной инженерии. Рассматриваются технологические основы создания синтетического контента, способы его применения в мошеннических и деструктивных целях. Анализируются методы обнаружения дипфейков в аудио- и видеоданных, а также особенности выявления синтетической идентичности в цифровой среде. Проанализировано влияние дипфейков на корпоративную и государственную безопасность, выявлены основные уязвимости существующих систем защиты. Особое внимание уделяется комплексным мерам противодействия, включающим технические, организационные и правовые механизмы.*

Ключевые слова: *аудиодипфейк, видеодипфейк, синтетическая идентичность, социальная инженерия, искусственный интеллект, обнаружение дипфейка, генеративная модель, цифровая идентичность, нейронная сеть, клонирование голоса.*

Рецензент: Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент. ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

В последние годы стремительное развитие технологий искусственного интеллекта привело к появлению нового класса цифровых угроз, связанных с генерацией синтетического контента, в частности дипфейков. Дипфейк-технологии позволяют создавать реалистичные аудио- и видеоматериалы, имитирующие речь, внешность и поведение реальных людей. Это существенно повышает эффективность атак социальной инженерии. В условиях цифровизации государственных и корпоративных процессов, а также широкого распространения удалённых коммуникаций, злоумышленники получают новые инструменты для манипуляции доверием,

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

компрометации учетных данных, проведения мошеннических операций и дестабилизации информационной среды в целом. Синтетическая идентичность, формируемая на основе поддельных цифровых следов, становится центром таких атак, усложняя их обнаружение и повышая уровень потенциального ущерба.

Целью исследования является комплексный анализ угроз, связанных с использованием дипфейков и синтетической идентичности в социальной инженерии, а также систематизация методов их обнаружения в аудио- и видеоданных. Внимание также уделяется выявлению уязвимостей в корпоративных и государственных системах безопасности, которые могут быть использованы злоумышленниками при реализации атак с применением синтетических медиа.

Научная значимость исследования заключается в углублении понимания роли синтетических медиа в современных киберугрозах и развитии теоретических и прикладных основ их обнаружения. Полученные результаты способствуют расширению научной базы в области противодействия цифровым манипуляциям, а также формированию новых подходов к защите корпоративных и государственных информационных систем.

Для начала рассмотрим теоретические основы дипфейков и синтетической идентичности. Развитие технологий искусственного интеллекта, в частности генеративных моделей, таких как GAN, автоэнкодеры и модели синтеза речи, привело к качественному скачку в создании синтетического контента. Дипфейки представляют собой искусственно сгенерированные аудио-, видео- или визуальные данные, которые имитируют реальные объекты с высокой степенью достоверности [10]. Как отмечают Т. Ван и соавторы, дипфейки формируют новый класс угроз, а одной из ключевых проблем становится недостаточная надежность систем их автоматического распознавания в реальных условиях [7]. Большую опасность представляет феномен синтетической идентичности — цифровой конструкции, в которой реальные и поддельные элементы, например лицо одного человека, голос другого и вымышленные биографические данные, объединяются в единый образ. Л. С. Ф. Лин пишет, что такие идентичности активно используются в организованном мошенничестве, включая финансовые преступления и кибератаки [3]. В отличие от традиционного фишинга, где злоумышленник опирается главным образом на текстовые коммуникации, дипфейки позволяют задействовать аудиовизуальные каналы, которые воспринимаются человеком как более достоверные.

Следует отметить, что синтетическая идентичность не сводится только к подделке изображения или голоса. В более широком смысле речь идет о создании устойчивого цифрового профиля, который способен пройти отдельные этапы проверки в информационных системах. По существу, злоумышленник конструирует новую

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

псевдоличность, комбинируя частично реальные и частично вымышленные данные. В исследованиях по идентификационному мошенничеству подчеркивается, что такая схема особенно опасна там, где проверка личности распределена между несколькими разрозненными системами и не строится на сквозной корреляции поведенческих, биометрических и документарных признаков [9]. Именно поэтому синтетическая идентичность становится удобным инструментом не только для разовых атак, но и для длительного присутствия в цифровой среде под видом легитимного субъекта.

Основной проблемой становится подрыв базового принципа доверия к цифровому контенту. Если ранее визуальное или голосовое подтверждение считалось надежным доказательством, то сейчас оно теряет свою валидность. С. Сонам и А. Дхумане указывают, что дипфейки ставят под угрозу саму концепцию достоверности информации в цифровой среде [5].

Современные атаки социальной инженерии также претерпевают значительную трансформацию под влиянием технологий генеративного искусственного интеллекта. Согласно статистическим данным, число инцидентов, связанных с использованием дипфейков, ежегодно увеличивается, а финансовый ущерб от таких атак продолжает расти [2]. Если ранее злоумышленники ограничивались фишинговыми письмами и телефонными звонками, то сегодня они используют высокореалистичные аудио- и видеоподделки для имитации доверенных лиц. По данным отчета ACFE и SAS, большинство специалистов по борьбе с мошенничеством отмечают рост атак социальной инженерии с использованием технологий искусственного интеллекта, включая дипфейки, при этом лишь около 7% организаций считают себя полностью готовыми к противодействию таким угрозам [6]. Более того, лишь небольшая доля организаций считает себя готовой к противодействию таким угрозам, что указывает на серьезный разрыв между развитием атакующих технологий и защитных механизмов. Особенно уязвимыми оказываются корпоративные структуры, где широко распространены иерархические модели управления и сценарии срочного согласования решений. Известны случаи, когда злоумышленники, используя синтезированный голос или изображение руководителя, передавали финансовым подразделениям указания о переводе денежных средств. При этом способность человека самостоятельно распознавать качественные дипфейки остается ограниченной, а потому во многих случаях пользователь не способен отличить подделку от реального контента без специализированных инструментов [1].

Рассмотрим методы создания дипфейков. Основу современных дипфейков составляют методы глубокого обучения, в частности генеративные состязательные сети, автоэнкодеры, технологии синтеза речи, преобразования голоса и модели диффузионного синтеза. Эти технологии позволяют генерировать полностью

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

синтетические изображения и голоса, не имеющие реального прототипа, а также модифицировать уже существующий контент. Как отмечают С. Сонам и А. Дхумане, развитие таких технологий происходит быстрее, чем совершенствование методов их обнаружения. Это создает своеобразную «гонку вооружений» между разработчиками атакующих и защитных решений [5]. В частности, внимания заслуживает технология клонирования голоса, которая стала одним из наиболее доступных и широко используемых инструментов злоумышленников. Она требует минимального количества исходных данных: в ряде случаев достаточно нескольких секунд записи речи. Это делает атаки масштабируемыми и дешевыми, что, в свою очередь, значительно увеличивает их распространенность.

Отдельного внимания заслуживает различие между традиционным мошенничеством с использованием чужой личности и синтетической идентичностью. При краже личности злоумышленник использует данные реально существующего человека. При синтетической идентичности формируется новая сущность, частично основанная на реальных идентификаторах, но не совпадающая ни с одной реальной персоной. Как показывают исследования в области выявления подделки личности, именно такие гибридные схемы труднее всего поддаются обнаружению, поскольку они могут выглядеть правдоподобно в рамках отдельных проверок и лишь при сопоставлении разнородных источников данных демонстрируют аномалии [9]. Следовательно, защита от таких угроз требует не только анализа самого медиафайла, но и проверки контекстных признаков: истории цифровой активности, согласованности метаданных, сетевых связей, поведенческих паттернов и сценария взаимодействия пользователя с системой.

Обнаружение дипфейков является одной из наиболее активно развивающихся областей в кибербезопасности и цифровой криминалистике. Современные методы можно условно разделить на несколько групп. Первая группа — методы анализа визуальных артефактов. Они основаны на выявлении несоответствий в изображении, таких как аномалии освещения, неестественная мимика, нарушения синхронизации губ, искажения текстур кожи и другие следы генерации. Вторая группа — методы анализа физиологических сигналов. Например, системы данного класса способны выявлять аномалии, связанные с микродвижениями лица, морганием, ритмом дыхания и непрямыми показателями кровотока. Третья группа — методы машинного обучения, в том числе нейронные сети, обученные на больших наборах данных. Однако, как отмечают Т. Ван и соавторы, такие модели сталкиваются с проблемами переносимости, интерпретируемости и устойчивости, особенно при встрече с новыми типами дипфейков [7]. Также важным направлением является комбинированный подход, объединяющий автоматические алгоритмы и участие человека. Как показывает исследование М. Гроха

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

и соавторов, совместное использование машинного анализа и человеческой оценки повышает точность обнаружения по сравнению с использованием только одного из этих методов [1].

Особую сложность представляет обнаружение аудиодипфейков. В отличие от видео, где могут быть заметны зрительные артефакты, поддельная речь часто воспринимается пользователем как более естественная, особенно если она воспроизводится в стрессовой или срочной ситуации. Современные исследования по обнаружению поддельной речи показывают, что для повышения устойчивости систем необходимо сочетать несколько уровней анализа: спектральные признаки, временные характеристики сигнала, модели на основе самоконтролируемого обучения и архитектуры, способные улавливать малозаметные следы синтеза или преобразования голоса [8,12]. Кроме того, перспективными направлениями признаются интерпретируемые модели, методы обнаружения с сохранением конфиденциальности, а также подходы, устойчивые к сжатию, шуму канала связи и неизвестным генеративным моделям [11]. Это особенно важно для корпоративных и государственных коммуникаций, где злоумышленники часто используют неидеальные, но достаточно убедительные аудиозаписи, передаваемые через мессенджеры, IP-телефонию и системы видеоконференций.

Дипфейки представляют собой серьезную угрозу как для отдельных пользователей, так и для организаций и государств. В корпоративной среде они используются для финансового мошенничества, промышленного шпионажа, компрометации деловой репутации, обхода процедур согласования и имитации управленческих указаний. Как указывает К. Т. Педерсен и соавторы, многие компании по-прежнему полагаются на традиционные системы безопасности, которые не учитывают специфику дипфейков и психологические механизмы доверия к аудиовизуальному контенту [4]. На государственном уровне угрозы включают распространение дезинформации, вмешательство в общественно-политические процессы, подрыв доверия к институтам власти и дискредитацию официальных лиц. Дипфейки могут использоваться для создания фальшивых заявлений политиков, имитации кризисных сообщений, фальсификации доказательств и искусственного нагнетания паники. Особую опасность представляет масштабируемость таких атак, поскольку один и тот же дипфейк может быть быстро распространен среди миллионов пользователей через социальные сети и цифровые платформы.

Следовательно, противодействие таким угрозам не может ограничиваться только внедрением отдельного программного средства обнаружения. Необходим комплекс организационных мер. К ним относятся: обязательная многофакторная верификация критически важных распоряжений; регламенты повторного подтверждения финансовых

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

и административных операций через независимый канал связи; сегментация полномочий; обучение сотрудников признакам синтетического контента; внедрение систем оценки риска цифровой идентичности; а также постоянный мониторинг аномалий в поведении учетных записей [4; 9]. Для государственных структур дополнительно актуальны механизмы цифровой аутентичности официальных сообщений, централизованные процедуры верификации публичных видеоматериалов и единые протоколы реагирования на информационные инциденты с использованием синтетических медиа.

Необходим комплексный подход к противодействию дипфейкам. Это включает развитие технологий обнаружения, совершенствование нормативно-правовой базы, повышение уровня цифровой грамотности пользователей и формирование практик ответственного обращения с синтетическим контентом. С. Сонам и А. Дхумане предлагают такие направления, как внедрение объяснимого искусственного интеллекта, использование федеративного обучения, развитие мультимодальной криминалистики и стандартизация подходов к цифровой аутентичности [5]. В свою очередь, систематические обзоры в области обнаружения мошенничества с идентичностью указывают на необходимость объединения биометрического анализа, поведенческих моделей, контекстных данных и межсистемной корреляции для формирования более надежных защитных механизмов [9]. Таким образом, борьба с дипфейками требует не только технологических решений, но и изменения подходов к обеспечению информационной безопасности в целом.

References

1. Groh M., Epstein Z., Firestone C., Picard r. Deepfake detection by human crowds, machines, and machine-informed crowds // www.pnas.org URL: https://www.pnas.org/doi/epdf/10.1073/pnas.2110013119

2. Khalil M. Deepfake Statistics 2025: AI Fraud Data & Trends // www.deepstrike.io URL: https://deepstrike.io/blog/deepfake-statistics-2025

3. Lin Leo S. F. Examining the Role of Deepfake Technology in Organized Fraud: Legal, Security, and Governance Challenges // www.researchgate.net URL: https://www.researchgate.net/publication/390852793_Examining_the_Role_of_Deepfake_Technology_in_Organized_Fraud_Legal_Security_and_Governance_Challenges

4. Pedersen K. T., Pepke L., Stærmose T., Papaioannou M., Choudhary G., Dragoni N. Deepfake-Driven Social Engineering: Threats, Detection Techniques, and Defensive Strategies in Corporate Environments // www.mdpi.com URL: https://www.mdpi.com/2624-800X/5/2/18

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

5. Sonam S., Dhumane A. Unmasking digital deceptions: An integrative review of deepfake detection, multimedia forensics, and cybersecurity challenges // www.sciencedirect.com URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215016125004765

6. Study: Deepfake fraud surges – and only 7% of organizations are firmly ready // www.sas.com URL: https://www.sas.com/en_za/news/press-releases/2026/march/acfe-anti-fraud-technology-study-deepfakes.html

7. Wang T.M, Chow K.P, Chang X., Wang Y. Deepfake Detection: A Comprehensive Study from the Reliability Perspective // arxiv.org URL: https://arxiv.org/pdf/2211.10881

8. Zhang B., Cui H., Nguyen V., Whitty M. Audio Deepfake Detection: What Has Been Achieved and What Lies Ahead // www.mdpi.com URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/25/7/1989

9. Zhang C. J., Gill A. Q., Liu B., Anwar M. J. AI-based Identity Fraud Detection: A Systematic Review // www.arxiv.org URL: https://arxiv.org/abs/2501.09239

10. Воронин И. А., Гавра Д. П. Дипфейки: современное понимание, подходы к определению, характеристики, проблемы и перспективы // cyberleninka.ru URL: https://cyberleninka.ru/article/n/dipfeyki-sovremennoe-ponimanie-podhody-k-opredeleniyu-harakteristiki-problemy-i-perspektivy/viewer

11. Дашинимаева В.Ц., Боршевников А.Е. Методы обнаружения ложных голосовых сигналов // www.ivdon.ru URL: https://www.ivdon.ru/back_media/uploads/article/pdf/IVD__75N6y25_dashinimaeva_borshevnikov.pdf_5663e2c463.pdf

12. Пономарёв К.Г., Верещагина Е.А. Применение сверточных нейронных сетей и алгоритмов глубокого обучения для прогнозирования и идентификации голосовых дипфейков // www.ivdon.ru URL: https://www.ivdon.ru/back_media/uploads/article/pdf/IVD_43N1y25_Ponomarev_Vereshagina.pdf_44aeeb20d9.pdf

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 629.7.058.6

Lavrentiev E.A., Orlov M.S. Mathematical model and method for quantifying the angular drift of an unmanned aerial vehicle based on neural network processing of video stream

Математическая модель и метод количественной оценки углового дрейфа курса беспилотного летательного аппарата на основе нейросетевой обработки видеопотока

Lavrentiev Evgeny Andreevich,
Graduate Student, Yuri Gagarin Saratov State Technical University, Saratov
Orlov Mikhail Sergeevich,
Graduate Student, Yuri Gagarin Saratov State Technical University, Saratov
Supervisor: **Egorov Igor Vladimirovich,**
PhD in Engineering, Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin
Лаврентьев Евгений Андреевич,
магистрант, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов
Орлов Михаил Сергеевич,
магистрант, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов
Научный руководитель:
Егоров Игорь Владимирович. Кандидат технических наук. Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Abstract. *The article offers a mathematical model for comparing the course readings obtained from sensors in a redundant inertial navigation system and an optical module installed on board an unmanned aerial vehicle. A quantitative method has been developed to assess the departure of the angular heading, which makes it possible to identify the synchronous drift of two inertial navigation systems, in which the "2 out of 3" majority logic mistakenly disables the only serviceable module and diverts the aircraft from the set course. An independent visual channel with neural network processing of the video stream from the optical module allows you to set a reliable course value and fend off an erroneous decision.*

Keywords: *inertial navigation system, course departure, neural network processing, sensor arbitration, UAV.*

Аннотация. *В статье предложена математическая модель сравнения показаний курса, полученных от датчиков в составе резервированной инерциальной навигационной системы и оптического модуля установленного на борту беспилотного летательного аппарата. Разработан количественный метод оценки ухода углового курса, позволяющий выявить синхронный дрейф двух инерциальных навигационных систем, при которой мажоритарная логика «2 из 3» ошибочно отключает единственный исправный модуль и уводит летательный аппарат от заданного курса. Независимый визуальный канал с нейросетевой обработкой видеопотока с оптического модуля позволяет установить достоверное значение курса и парировать ошибочное решение.*

Ключевые слова: *инерциальная навигационная система, уход курса, нейросетевая обработка, арбитраж датчиков, БЛА.*

Рецензент: Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент. ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

Введение. Безопасность выполнения автономного полёта беспилотного летательного аппарата (БЛА) при подавлении спутниковых навигационных сигналов зависит от точности и надежности инерциальных навигационных систем (ИНС). Одной из известных проблем является постоянный уход угла курса (рыскания), вызванный дрейфом нуля гироскопов. Во время продолжительного полёта ошибка накапливается

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

и может привести к отклонению от заданного маршрута на значительное расстояние. Для повышения надёжности в бортовых комплексах управления применяют резервирование ИНС, в количестве трех модулей ИНС. В идентичных условиях эксплуатации дрейфы модулей могут быть схожими, и без внешнего эталонного источника невозможно определить, какая из систем «ушла», а какая передает достоверные данные [1, 3]. Внешним эталоном, не подверженным схожему накоплению ошибки, может служить бортовой оптический модуль, направленный в сторону подстилающей поверхности и отсылающий видеопоток в нейросетевой модуль. Нейронные сети на данный момент позволяют надёжно обнаруживать и сопровождать ключевые точки ландшафта даже в условиях отсутствия искусственных ориентиров [2]. Проводя сравнение курса, вычисленного по смещению ключевых точек, с курсом от каждой ИНС, можно зафиксировать факт расхождения, и количественно оценить величину дрейфа и идентифицировать вышедший из строя модуль. В настоящей статье приводится математический аппарат, реализующий такую систему анализа.

Математическая модель и метод количественной оценки углового дрейфа.

Рассматривается полёт БЛА на высоте *h* над участком местности, который будет считаться горизонтальной плоскостью. На борту установлен оптический модуль с матрицей внутренних параметров *K*, жёстко закреплённый в надир. В состав резервированного навигационного комплекса входят три инерциальных модуля ИНС1, ИНС2, ИНС3, выдающих текущие значения угла рыскания $\hat{\psi}_{\text{ИНС1}}(t)$, $\hat{\psi}_{\text{ИНС2}}(t)$ и $\hat{\psi}_{\text{ИНС3}}(t)$. Оптический модуль, обрабатывает кадры и производит вычисление приращение угла рыскания $\Delta\psi_{vis}$, формирует оценку курса $\hat{\psi}_{vis}[k]$. Основная задача вычислителя оптического модуля - по совокупности измерений установить наличие, величину и локализацию углового дрейфа.

1. Связь смещения ключевых точек с движением камеры. Пусть на двух соседних кадрах *k* и *k+1* сопоставлены в однородных координатах группа ключевых точек $\{p_i^{(k)}\}$ и $\{p_i^{(k+1)}\}$. Для плоской трансформации координат выполняется описание преобразованием – гомография $H \in R^{3x3}$;

$$p_i^{(k+1)} \sim H\, p_i^{(k)}, \qquad (1)$$

где $H = K\,(R - \frac{tn^T}{d})\,K^{-1}$. R – матрица поворота камеры, t - вектор её перемещения между кадрами, n – единичная нормаль к поверхности земли, *d* - расстояние от камеры до плоскости. Оценка *H* осуществляется методом RANSAC по сопоставленным точкам [5].

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

2. Извлечение приращения угла рыскания. Выполнив нормализацию $\widetilde{H} = K^{-1}HK$ и сингулярное разложение матрицы $\widetilde{H}$, с учётом априорно известной нормали *n* найдено физически корректное решение для *R*. Из матрицы поворота выделяют угол поворота вокруг оси, ортогональной земле - рыскание:

$$\Delta\psi_{vis}^{(k)} = atan2(R_{21},\ R_{11}), \qquad (2)$$

где R_{ij} – элементы *R* при разложении в последовательности ZYX. Данный подход компенсирует влияние крена и тангажа, а также изменение высоты, заложенные в структуру *H* [4].

3. Начальная выставка и накопление визуального курса. В момент начала движения, когда все три ИНС заведомо исправны, выполняется синхронизация: $\hat{\psi}_{vis}[0] = \hat{\psi}_{\text{ИНС1}}(0)$. Абсолютный визуальный курс для кадра *k* вычисляется рекуррентно:

$$\hat{\psi}_{vis}[k] = \hat{\psi}_{vis}[k-1] + \Delta\psi_{vis}^{(k)}. \qquad (3)$$

Предполагается, что на интервале наблюдения примерно до 120 секунд дрейф визуального канала, вызванный ошибками интегрирования, пренебрежимо мал.

4. Модель измерений инерциальных систем. Каждый инерциальный модуль выдаёт курс, содержащий истинное значение ψ_{true}, уход $b_i(t)$ и широкополосный шум $\eta_i(t)$:

$$\hat{\psi}_{\text{ИНС}i}[t] = \psi_{true}(t) + b_i(t) + \eta_i(t),\ i = 1,2,3. \qquad (4)$$

В исправном состоянии $b_i(t)$ представляет собой случайный процесс малой интенсивности. Отказ одного модуля приводит к появлению у него дополнительной составляющей ухода. Отказ по общей причине двух модулей, например ИНС2 и ИНС3, характеризуется близкими реализациями процессов $b_2(t)$ и $b_3(t)$ при сохранении малости $b_1(t)$.

5. Временное согласование и вычисление ошибок. Видеопоток поступает с низкой частотой f_{vis}, до 20 Гц, и задержкой τ_d на обработку встроенной нейросетью. Высокочастотные инерциальные сигналы, до 500 Гц, интерполируются на моменты t_k формирования визуальных оценок, после чего определяются мгновенные ошибки:

$$\varepsilon_i[k] = \hat{\psi}_{\text{ИНС}i}[t_k] - \hat{\psi}_{vis}[k],\ i = 1,2,3. \qquad (5)$$

Для подавления шумовой составляющей вычисляют скользящие средние по промежутку из *N* последних кадров:

$$\varepsilon_i[k] = \frac{1}{N}\sum_{j=k-N+1}^{k} \varepsilon_i[j] \qquad (6)$$

6. Критерий обнаружения и идентификации ухода. В систему внедрены модули сглаженных данных $d_i = |\underline{\varepsilon_i}|$ и два порога: τ – допустимая погрешность курса, δ

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

– максимально допустимое различие между уходами двух ИНС, чтобы считать их отказ общим. Анализ вектора $(d_1,\ d_2,\ d_3)$ позволяет диагностировать состояние:

–Норма: $d_i \leq \tau$ для всех *i*. Все три ИНС согласованы с визуальным курсом.

–Одиночный отказ: одно значение $d_i > \tau$, два других $\leq \tau$. Мажоритарная логика исключает отказавший модуль, визуальный канал подтверждает отказ.

–Синхронный отказ двух ИНС: два значения $d_j, d_k > \tau$, причём $|d_j - d_k| \leq \delta$, а третье $d_m \leq \tau$. В этом случае два модуля *j* и *k* имеют близкий уход, составляя неисправное большинство, а исправным является модуль *m*. Визуальный канал идентифицирует эту ситуацию, и система принудительно переключается на использование курса $\hat{\psi}_{\text{ИНС}m}$, игнорируя показания двух других.

–Отказ визуального канала: все три $d_i > \tau$ или одновременно $d_j, d_k > \tau$, но $|d_j - d_k| > \delta$ и d_m также велико. В этом случае визуальные данные признаются недостоверными, и управление переходит на инерциальное счисление с предупредительной сигнализацией.

Количественная оценка скорости ухода для отказавших модулей производится по формуле:

$$\dot{b}_i \approx \frac{\underline{\varepsilon}_i[k] - \underline{\varepsilon}_i[k-M]}{M\,\Delta t} \qquad (7)$$

где Δt – интервал между видеоизмерениями, *M* - размер промежутка для вычисления приращения средней ошибки. Для случая синхронного отказа двух ИНС $\dot{b}_j \approx \dot{b}_k$.

Заключение. Разработанная математическая модель и метод арбитража позволяют обнаруживать угловой дрейф и количественно оценить его в резервированной инерциальной системе, включая ситуацию синхронного ухода двух модулей. Применение независимого визуального канала с нейросетевой обработкой видеопотока [2] даёт возможность рассчитать истинный курс и парировать ошибку мажоритарной логики. Предложенный критерий, основанный на анализе модулей ошибок d_i и порогов $\tau,\ \delta$ обеспечивает идентификацию типа отказа и выбор достоверного канала. Дальнейшие исследования будут направлены на экспериментальную верификацию метода в лётных испытаниях и оптимизацию пороговых значений для минимизации вероятностей ложного срабатывания.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

References

1. Чжу, Ю., Янг, Ю., Лю, М. и др. Обзор методов слияния нескольких датчиков для беспилотных летательных аппаратов в условиях, когда GNSS недоступен // Журнал IEEE Sensors Journal. – 2023. – Т. 23, № 8. – С. 7895-7915.

2. 2. Досовицкий А., Фишер П., Ильг Э. и др. FlowNet: Изучение оптического потока с помощью сверточных сетей // Материалы Международной конференции IEEE по компьютерному зрению (ICCV). – 2015. – С. 2758-2766.

3. 3. Муртал Р., Тардос Дж.Д. ORB-SLAM3: точная библиотека с открытым исходным кодом для визуального, визуально-инерциального и многомартового SLAM // IEEE Transactions on Robotics. – 2021. – Том 37, № 6. – С. 1874-1890.

4. 4. Цинь Т., Ли П., Шен С. ВИНС-Моно: надежный и универсальный монокулярный визуально-инерциальный оценщик состояния // IEEE Transactions on Robotics. – 2018. – Том 34, № 4. – С. 1004-1020.

5. 5. Барат, Д., Мэйтас, Дж. MAGSAC++: быстрый, надежный и устойчивый сэмплер // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2021. – Том 43, № 10. – С. 3479-3494.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 624.014:620.193

Supletsov V.S., Sobakin E.V. Comparative analysis of methods for assessing the physical deterioration of load-bearing steel structures of industrial buildings and structures

Сравнительный анализ методов оценки физического износа несущих стальных конструкций производственных зданий и сооружений

Supletsov Vladimir Sergeevich,
Ph.D. tech. Sciences, Associate Professor,
North-Eastern Federal University. M.K. Ammosova, Yakutsk
Sobakin Evgeniy Vladislavovich,
student, North-Eastern Federal University. M.K. Ammosova, Yakutsk
Суплецов Владимир Сергеевич,
канд. техн. наук, доцент,
Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск
Собакин Евгений Владиславович,
студент, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск

Abstract. *This study compares the approaches used in the Russian practice of technical condition assessment of buildings and structures for determining the physical deterioration of structural components, with the aim of evaluating their applicability to industrial facilities with steel frames. Five primary methods are analyzed: the normative-expert method, the instrumental-measurement method, the calculation-analytical method, the residual life prediction method, and the probabilistic-statistical method. For each method, the relevant regulatory documents are cited, and its advantages and disadvantages are examined with respect to the main factors of steel deterioration — corrosion damage and reduction of cross-sectional area. The results are summarized in a table that groups the methods according to accuracy, labor intensity, required equipment, and field of application.*

Keywords: *physical deterioration; steel structures; corrosion; technical inspection; residual life; load-bearing capacity*

Аннотация. *Работа посвящена сопоставлению подходов, по которым в отечественной практике технического обследования зданий и сооружений определяют физический износ строительных конструкций, с целью оценки возможности их применения для производственных объектов со стальными каркасами. Для анализа рассмотрены пять основных методов: нормативно-экспертный, инструментально-измерительный, расчётно-аналитический, прогноз остаточного ресурса и вероятностно-статистический. По каждому из них приведены регламентирующие нормативные документы, рассмотрены достоинства и недостатки применительно к основным факторам износа стали — коррозионное разрушение и уменьшение площади сечения. Итоги обобщены в таблице, где методы сгруппированы по точности, трудоёмкости, требуемому оснащению и сфере использования.*

Ключевые слова: *физический износ; стальные конструкции; коррозия; техническое обследование; остаточный ресурс; несущая способность.*

Рецензент: Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

Значительный объем объектов промышленного и гражданского фонда страны уже исчерпал отведённый нормами срок службы. По мере эксплуатации несущие стальные конструкции — фермы, балки, колонны, узлы каркасов — теряют свои

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

свойства, и первопричиной этого выступает коррозия, что очень распространено, к примеру, в промышленных зданиях и сооружениях горно-обогатительных комбинатов АК «АЛРОСА» в Западной Якутии. Коррозионный износ является основным фактором снижения несущей способности и в ряде случаев сформировал условия для исчерпания несущей способности конструкций обогатительных фабрик и пригодности их к нормальной эксплуатации [1]. Объективное определение износа становится непременным условием механической безопасности объекта, такое требование напрямую закреплено Федеральным законом № 384-ФЗ [2].

В реальной практике параллельно существует несколько подходов к оценке износа. Они ощутимо расходятся по точности, объёму трудозатрат и опоре на нормативную базу, а потому подбор подходящего варианта оказывается достаточной сложной задачей.

Под физическим износом понимают постепенную утрату конструкцией первоначальных эксплуатационных свойств — прочности, жёсткости, устойчивости — под влиянием природных и эксплуатационных воздействий. Численно его выражают долей в процентах от стоимости либо ресурса нового аналога [3].

Для стали одним из основных факторов износа является коррозия. Тогда как у железобетона деградация определяется, прежде всего, трещинообразованием и нарушением защитного слоя, в стальном элементе коррозия непосредственно сокращает расчётную площадь сечения. Уменьшение сечения влечет за собой снижение несущей способности, а также местной и общей устойчивости. Дополнительное негативное влияние оказывают механические повреждения, усталость металла при повторяющихся нагрузках, ослабление соединений и температурные деформации [11]. Согласно действующим методикам, снижение расчётного сечения от коррозии свыше 25% переводит конструкцию в категорию ограниченно-работоспособного или аварийного состояния [4, 11].

Нормативно-экспертный метод. Сущность метода заключается в том, что зафиксированные при визуальном осмотре дефекты соотносятся с табличными показателями износа из ВСН 53-86(р) «Правил оценки физического износа жилых зданий» [3]. Поскольку сложная аппаратура не требуется, способ широко востребован у органов технической инвентаризации и в сфере жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ). Вывод по итогам оценки определяется квалификацией специалиста и внешними дефектами, и повреждениями, с использованием простейших средств измерений. При этом, влияние отклонений на действительную потерю несущей способности таблицы не учитывают. Основным минусом данного метода является полное отсутствие признаков износа для стальных конструкций, что делает невозможным его практическое применение для оценки физического износа производственных зданий и сооружений с

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

металлическими каркасами.

Инструментально-измерительный метод. В данном методе определяют фактические характеристики конструкции: толщину элементов ультразвуковыми приборами, глубину коррозионных каверн, прогибы, отклонения от вертикали и т.п. Последовательность действий установлена в ГОСТ 31937-2024 [3] и СП 13-102-2003 [5]. В итоге получается объективная картина технического состояния. Сложностью данного метода являются необходимость обеспечения беспрепятственного доступа к элементам с необходимыми вскрытиями, наличие различных приборов и подготовленных специалистов с различной квалификацией.

Расчётно-аналитический метод. Здесь, опираясь на материалы инструментального обследования, выполняют поверочный расчёт несущей способности с учетом, например, ослабленного коррозией сечения по СП 16.13330.2017 [6]. Износ при таком подходе означает относительное снижение несущей способности по отношению к проектной. Достоинство метода — прямая взаимосвязь износа с прочностью и устойчивостью конструкции. Среди основных недостатков можно отметить высокую трудоёмкость (включает практически весь объем работ инструментально-измерительного метода) и зависимость от проектной документации, которая для объектов с длительным сроком эксплуатации часто бывает утрачена.

Метод оценки остаточного ресурса. Метод базируется на прогнозировании сроков безопасной эксплуатации. Прогноз опирается на закономерности изменения определяющих параметров, таких как механические дефекты и повреждения, скорость коррозии и т.п. [7, 9]. Похожая методика входит, к примеру, в отраслевой стандарт для конструкций атомных станций [8]. Подход даёт возможность планировать ремонтные работы, но требуются сведения о развитии износа во времени, которые при единичном обследовании (осмотре), как правило, отсутствуют.

Вероятностно-статистический метод. В этом подходе, процесс накопления коррозионных повреждений описывают статистически, а надёжность конструкции оценивают с поправкой на случайный разброс прочностных и геометрических показателей, прибегая в том числе к методу Монте-Карло [9, 10]. С теоретической точки зрения этот метод наиболее точен. Однако его сложность и дефицит статистики ограничивают практическое применение преимущественно ответственными и уникальными зданиями и сооружениями.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Таблица 1

Сравнение методов оценки физического износа строительных конструкций

Метод	Точность	Трудоёмкость	Оборудование	Нормативная база	Область применения
Нормативно-экспертный	Средняя	Низкая	Не требуется	ВСН 53-86(р) [3]	Массовая предварительная оценка
Инструментально-измерительный	Высокая	Средняя	Толщиномеры, измерительные приборы	ГОСТ 31937-2024 [4], СП 13-102-2003 [5]	Детальное обследование
Расчётно-аналитический	Высокая	Высокая	Данные обследования, ПК, расчётное ПО	СП 16.13330.2017 [6]	Оценка несущей способности
Оценка остаточного ресурса	Средняя/высокая	Высокая	Данные обследования или мониторинга	ГОСТ 27.002-2015 [7], [8]	Прогноз срока службы
Вероятностно-статистический	Высокая	Очень высокая	ПО, статистические данные	Научные методики [9, 10]	Уникальные здания и сооружения

Как показало сравнение исходя из Таблицы 1, полностью универсального метода не существует, ведь у всех них есть свои преимущества и недостатки. Выбор того или иного метода зависит от многих факторов. Экспертная оценка имеет большую скорость и среднюю точность, вероятностное моделирование одно из самых точных, но оно не очень подходит для обследований с большим объемом задач из-за высокой трудоемкости. Для стальных конструкций инструментальный и расчётный методы, наиболее подходящие тем, что напрямую учитывают утонение сечения от коррозии — то есть основной механизм износа, но имеют большие затраты по трудоемкости для получения исходных данных и применения специализированного оборудования и программных комплексов.

По итогу, существующие методики оценки физического износа стальных конструкций выстроились в шкалу от точности к трудоёмкости. Начинается она быстрой ориентировочной оценкой по ВСН 53-86(р), а завершается вероятностным моделированием надёжности. Для стали характерен износ в виде коррозионного утонения сечения, и самые информативные результаты по отдельности дают инструментально-измерительный и расчётно-аналитический методы, которые напрямую выводят на остаточную несущую способность. Лучше всего себя показывает

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

комбинированная схема: сначала проводят экспертный осмотр на предварительной стадии, затем делают инструментальные замеры и расчёты для более точной оценки, а в завершение делают прогноз остаточного ресурса, чтобы грамотно спланировать эксплуатацию ответственных конструкций.

References

1. Суплецов В.С. Прогнозирование сроков службы стальных конструкций производственных зданий в экстремальных условиях эксплуатации : дис. ... канд. техн. наук : 2.1.1 / Суплецов Владимир Сергеевич. — Улан-Удэ, 2022.

2. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений: Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ.

3. ВСН 53-86(р). Правила оценки физического износа жилых зданий. — М.: Госгражданстрой, 1988.

4. ГОСТ 31937-2024. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. — М.: Российский институт стандартизации, 2024.

5. СП 13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. — М.: Госстрой России, 2003.

6. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. — М.: Минстрой России, 2017.

7. ГОСТ 27.002-2015. Надёжность в технике. Термины и определения. — М.: Стандартинформ, 2016.

8. ГОСТ Р 58341.12-2022. Строительные конструкции зданий и сооружений атомных станций. Учет фактически выработанного и оценка остаточного ресурса. — М.: Российский институт стандартизации, 2022.

9. Майстренко И.Ю. Оценка остаточного ресурса эксплуатируемых стальных конструкций: дис. … канд. техн. наук: 05.23.01. — Казань, 2006.

10. Смоляго Г.А., Фролов Н.В. Современные подходы к расчету остаточного ресурса изгибаемых железобетонных элементов с коррозионными повреждениями. Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019;(6):88-100.

11. Пособие по обследованию строительных конструкций зданий / АО «ЦНИИПромзданий». — М., 1997.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 629.439

Ulyanov S.I. Advantages of using permanent magnets for lifting force generation in magnet-levitating trains

Перспективы применения постоянных магнитов для создания подъемной силы в магнитолевитационных поездах

Ulyanov Sergey Igorevich
postgraduate
Russian University of transport
Scientific advisor:
Petrov Gennady Ivanovich
Doctor of Engineering, professor
Russian University of transport
Ульянов Сергей Игоревич
аспирант
Российский университет транспорта
Научный руководитель:
Петров Геннадий Иванович
доктор технических наук, профессор
Российский университет транспорта

Abstract. *The article analyzes the prospects for using permanent magnets as sources of lifting force for magnetic levitation transport. Physical principles of creating levitation based on permanent magnets are considered, various configurations of magnetic systems, including Halbach arrays, are compared. Special attention is paid to the advantages and limitations of using rare-earth NdFeB magnets in transport systems, hybrid solutions combining permanent magnets with electromagnets and superconductors. Technical and economic characteristics of magnetostatic and magnetodynamic levitation systems are analyzed. The feasibility of using permanent magnets in urban and suburban transport systems with moderate speeds is substantiated. Directions for further research on improving energy efficiency and reducing weight and size parameters of levitation systems are shown.*

Keywords: *magnetic levitation, permanent magnets, Halbach array, magnetic levitation transport, high-temperature superconductors, maglev, magnetostatic levitation, rare-earth magnets.*

Аннотация. *Статья посвящена анализу перспектив применения постоянных магнитов в качестве источников подъемной силы для магнитолевитационного транспорта. Рассматриваются физические принципы создания левитации на основе постоянных магнитов, сравниваются различные конфигурации магнитных систем, включая массивы Хальбаха. Особое внимание уделяется преимуществам и ограничениям использования редкоземельных магнитов NdFeB в транспортных системах, гибридным решениям, сочетающим постоянные магниты с электромагнитами и сверхпроводниками. Проанализированы технико-экономические характеристики магнитостатических и магнитодинамических систем левитации. Обоснована целесообразность применения постоянных магнитов в городских и пригородных транспортных системах с умеренными скоростями движения. Показаны направления дальнейших исследований по повышению энергоэффективности и снижению массогабаритных показателей левитационных систем.*

Ключевые слова: *магнитная левитация, постоянные магниты, массив Хальбаха, магнитолевитационный транспорт, высокотемпературные сверхпроводники, маглев, магнитостатическая левитация, редкоземельные магниты.*

Рецензент: Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

Физические основы левитации на постоянных магнитах

Создание подъемной силы с помощью постоянных магнитов представляет собой одно из наиболее перспективных направлений развития транспортных технологий в

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

области высокоскоростного магнитолевитационного транспорта. Физическая суть явления заключается во взаимодействии магнитных полей, создаваемых постоянными магнитами, размещенными на борту транспортного средства и, либо аналогичных постоянных магнитов в путевой структуре, либо замкнутых проводящих контуров, генерирующих непостоянное магнитное поле под действием индукционных вихревых токов.

Современные редкоземельные магниты на основе сплава неодим-железо-бор (NdFeB) обладают высокой остаточной магнитной индукцией – порядка 1,2–1,4 Тл, что позволяет генерировать значительные силы притяжения или отталкивания без подвода электрической энергии [3]. Преимущество такой схемы очевидно: отсутствие энергопотребления на создание магнитного поля снижает эксплуатационные затраты и повышает надёжность системы. Впрочем, это справедливо не для всех режимов работы – на этапе разгона и при изменении нагрузки требуется активная система стабилизации.

Ключевым вопросом остается устойчивость левитации. Рассмотрим этот вопрос, ссылаясь на теорему Ирншоу. Согласно ей, для потенциального поля, в котором плотность энергии подчиняется уравнению Лапласа (1), не существует локальных минимумов потенциала в свободном пространстве.

$$\nabla^2 \cdot \varphi = 0 , \quad (1)$$

где ∇ – лапласиан, сумма вторых частных производных по координатам (x, y, z);

φ – электростатический потенциал, В.

Все экстремумы – это точки, где по одним направлениям сила возвращает тело к равновесию, а по другим – уводит от него. Соответственно, нельзя создать конфигурацию постоянных магнитов, в которой тело в состоянии покоя находилось бы в устойчивой левитации. Однако эта проблема решается либо комбинированием постоянных магнитов с системой активной балансировки на электромагнитах, либо применением магнитодинамической схемы, где левитация возникает при движении магнитов относительно проводящих путевых структур [7].

В работах российских и зарубежных исследователей показано, что при использовании массивов Хальбаха – специальной конфигурации постоянных магнитов с определенной ориентацией векторов намагниченности, позволяющая сконцентрировать поле с одной стороны сборки и почти полностью его погасить с другой. Вследствие этого удается достичь двукратного увеличения магнитной индукции в рабочем зазоре по сравнению с традиционными сборками постоянных магнитов [1]. Расположение элементарных магнитных блоков в сборке Хальбаха обеспечивает концентрацию силовых линий с одной стороны сборки и минимизацию полей рассеяния

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

с противоположной. Это принципиально важно для пассажирского транспорта, где требуется экранирование магнитного поля от салона.

Магнитодинамическая левитация с массивами Хальбаха позволяет начать подъем транспортного средства уже при скорости около 3-10 км/ч, когда движущееся магнитное поле индуцирует вихревые токи в путевых проводящих структурах [2]. Рабочий зазор в таких системах может достигать 100 мм, что существенно упрощает требования к точности монтажа путевого полотна и несущих элементов.

Конфигурации постоянных магнитов и их эффективность

Выбор конфигурации магнитной системы определяет не только величину подъемной силы, но и энергетическую эффективность, массогабаритные показатели транспортного средства и стоимость строительства и эксплуатации инфраструктуры.

Исследования показывают, что существует четыре основных варианта реализации массива Хальбаха из элементарных постоянных магнитов, различающихся углом поворота векторов намагниченности соседних элементов. Первая схема предполагает поворот на $\pi/2$ – $\pi/2$, вторая – $\pi/4$ – $\pi/2$ – $\pi/4$, третья – четыре последовательных поворота по $\pi/4$, четвертая – два последовательных поворота $\pi/4$ [5]. Полюсное деление τ различается для разных схем и составляет $4l$, $6l$ или $8l$, где l – длина элементарного магнита.

Экспериментальные данные, полученные на макетных образцах, подтверждают теоретические расчеты: при скорости движения 10 м/с (36 км/ч) и полюсном делении 200 мм частота наводимой ЭДС в путевой проводящей структуре составляет 50 Гц [5]. На начальном этапе набора скорости, при 1 м/с, частота снижается до 5 Гц, но подъемная сила уже формируется благодаря малому полюсному делению магнитной системы. Здесь важна оговорка: эффективность левитации на низких скоростях критически зависит от конструкции путевой проводящей структуры.

Сравнительный анализ различных вариантов сборки выявил, что коэффициент эффективности левитации (2) на участке разгона транспортного средства примерно одинаков для всех схем Хальбаха.

$$k_{LD} = \frac{F_L}{F_D}, \qquad (2)$$

где k_{LD} – коэффициент эффективности левитации;

F_L – подъемная сила, Н;

F_D – сила электродинамического сопротивления, Н.

Впрочем, ситуация здесь неоднородная. Выбор конкретной схемы обусловлен противоречивыми требованиями: необходимостью увеличения подъемной силы и

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

минимизацией расхода редкоземельных материалов. Простейшая схема (п/2 – п/2) требует меньше элементарных магнитов, но создает несколько меньшую индукцию по сравнению со сложными сборками.

В реальных маглевах чаще всего используется линейный дискретный односторонний массив Хальбаха, где все магниты выстраиваются в ряд на транспортном средстве, создавая мощное поле только снизу, в сторону направляющей (Рис. 1, а). Реже применяется сдвоенный линейный массив, где магниты располагаются в два слоя (друг над другом или с противоположных сторон от путевой структуры) (Рис. 1, б). Увеличение количества магнитов напрямую повышает магнитный поток, что позволяет частично решить проблему недостаточной подъемной силы на малых скоростях. При этом элементарные постоянные магниты чаще всего располагают с фиксированным поворотом каждого последующего элемента на шаг п/2 либо п/4.

Анализ ряда патентных разработок демонстрирует интерес к гибридным конструкциям, где постоянные магниты дополняются электромагнитами переменной полярности [6]. Такая комбинация обеспечивает левитацию на стоянке и малых скоростях за счет притяжения к ферромагнитной направляющей (режим электромагнитного подвеса) (Рис. 2, в), а при увеличении скорости система переключается на режим электродинамического отталкивания от проводящей путевой структуры (Рис. 2, г). Это решение позволяет использовать магнитные полюса одновременно для двух режимов работы, снижая общую массу бортового оборудования.

Отдельного внимания заслуживает вопрос температурной стабильности постоянных магнитов NdFeB, – при повышении температуры выше 80-100°C их магнитные свойства существенно деградируют [4]. Данное ограничение особенно критично для грузовых систем с высокой нагрузкой и интенсивным вихретоковым нагревом при торможении.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

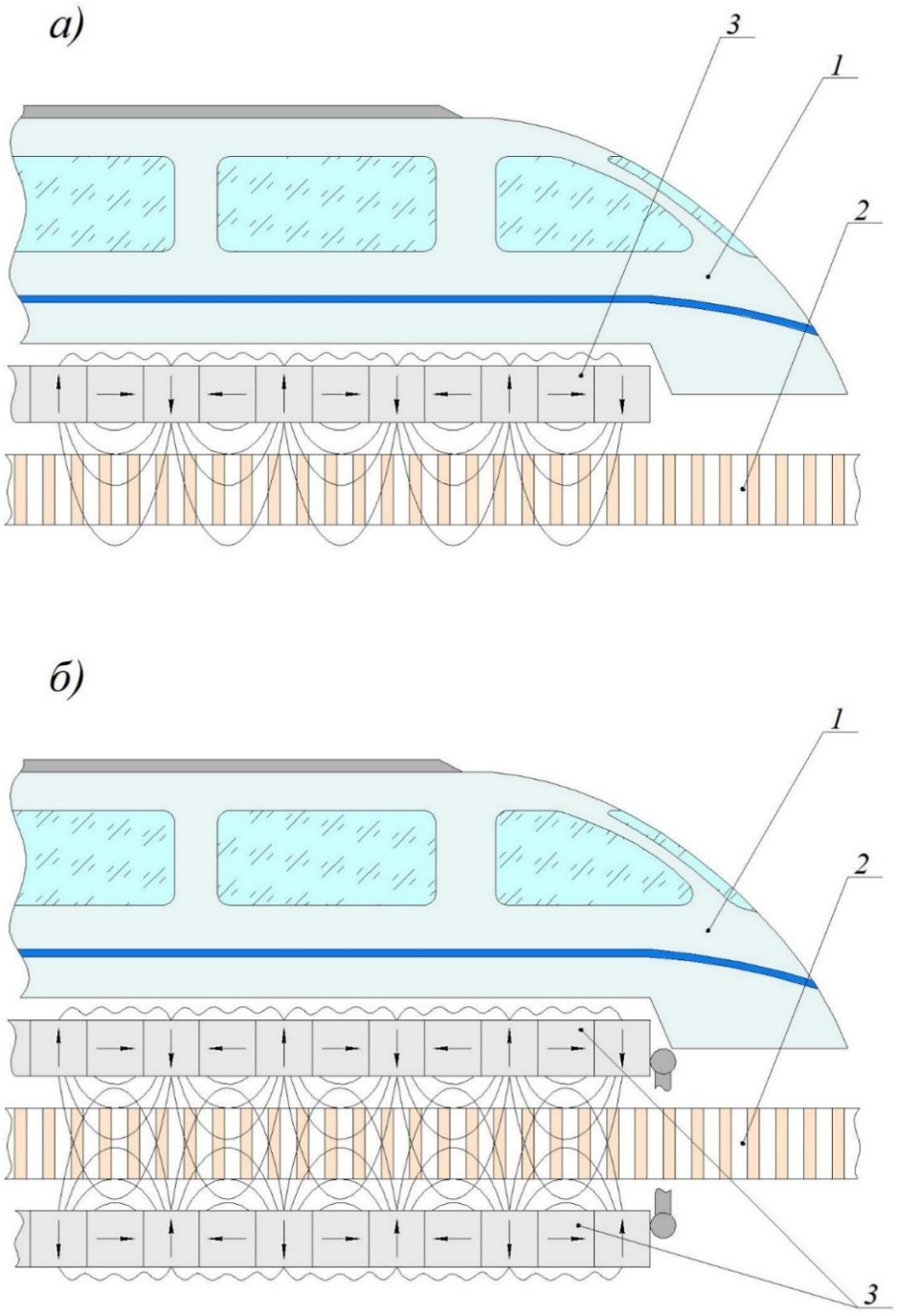


Рис. 1 – Принципиальная схема электродинамических подвесов с постоянными магнитами в сборках Хальбаха с углом поворота элементов п/2:
а) односторонний линейный массив; *б)* сдвоенный линейный массив;
1 – корпус поезда; *2* – путевая структура с проводящими контурами;
3 – элементарные магниты массивов Хальбаха (стрелками показано направление векторов намагничивания).

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

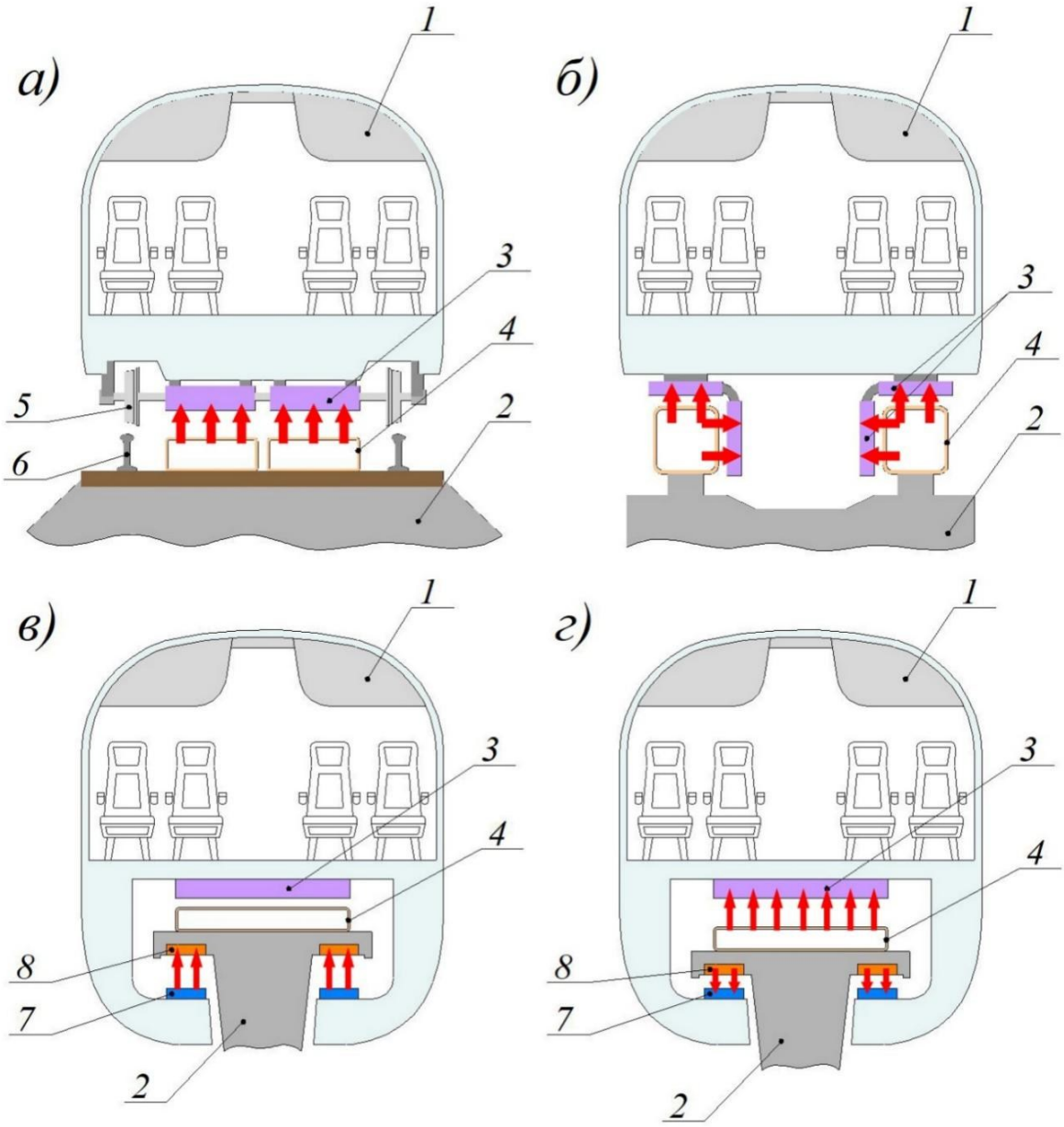


Рис. 2 – Структурные схемы распространенных подвесов с постоянными магнитами (красными стрелками показано направление магнитных сил):
а) односторонний магнитодинамический; *б)* угловой магнитодинамический; *в)* односторонний комбинированный, в режиме статической левитации;
г) в режиме динамической левитации
1 – корпус поезда; *2* – несущая путевая структура;
3 – сборки массивов Хальбаха; *4* – проводящая путевая структура;
5 – разгонные колёса; *6* – разгонные рельсы; *7* – электромагниты с переменной полярностью; *8* – ферромагнитная путевая структура.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Гибридные системы: постоянные магниты и сверхпроводники

Комбинирование постоянных магнитов с высокотемпературными сверхпроводниками (ВТСП) второго поколения представляет собой техническое решение, которое способно значительно улучшить массогабаритные характеристики левитационных систем и одновременно снизить требования к криогенному обеспечению [2].

Проект «Царскосельский Маглев», разрабатываемый в России, ставит целью создание многофункциональной транспортной технологии, где в бортовом электроэнергетическом оборудовании комплексно используются постоянные магниты и сверхпроводники [2]. ВТСП-материалы позволяют удвоить магнитную индукцию поля в рабочем зазоре по сравнению с постоянными магнитами, достигая значений 2,5–4 Тл вместо 1,2–1,4 Тл у NdFeB. Критически важно, что эта технология требует охлаждения не до 4,2 K (температура жидкого гелия), а лишь до 30–77 K (диапазон азотного охлаждения или работы криокулеров), что существенно упрощает эксплуатацию.

В гибридных системах постоянные магниты принимают на себя основную статическую нагрузку, обеспечивая левитацию без потребления энергии, а электромагниты задействуются лишь в переходных режимах – при изменении нагрузки, разгоне или торможении. Мощность в таких системах расходуется преимущественно в динамике, нагрев катушек минимизируется, что повышает срок службы оборудования.

Опыт китайских разработчиков высокоскоростного маглева показывает перспективность гибридного подхода. В испытаниях двухвагонного состава, оснащенного постоянными магнитами NdFeB в комбинации с электромагнитами, удалось снизить энергопотребление левитационной системы с традиционных 1000 Вт/т более чем в два раза [8]. Левитационный зазор в таких системах поддерживается на уровне 8-10 мм при целевой скорости движения свыше 400 км/ч.

Проблема перехода ВТСП-материалов в нормальное состояние при потере криоагента решается методом топологической активации – специальной технологией намагничивания объемных ВТСП по месту их установки в левитационных модулях [9]. Персональные постоянные магниты, размещенные рядом с каждым ВТСП-элементом, создают начальное поле, необходимое для захвата магнитного потока сверхпроводником в процессе охлаждения.

Сравнение различных типов левитационных систем

Выбор типа левитационной системы определяется прежде всего назначением транспортного средства, требуемой скоростью движения и экономическими ограничениями.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Магнитостатическая левитация на постоянных магнитах обеспечивает подъемную силу независимо от скорости движения, включая нулевую скорость на стоянках. Это критически важно для городского и пригородного транспорта, где частые остановки составляют значительную часть эксплуатационного цикла [2]. Левитационный зазор в таких системах относительно невелик – обычно 8-15 мм, что предъявляет жесткие требования к геометрической точности путевого полотна и необходимости компенсации температурных деформаций.

Магнитодинамическая левитация с постоянными магнитами в схеме Хальбаха возникает при движении и усиливается с ростом скорости. Начальная скорость появления левитации может быть снижена до 1-3 м/с за счет уменьшения полюсного деления и применения специальных путевых треков из литцы или перфорированного ламината [10]. Рабочий зазор в таких системах существенно больше – до 100 мм, что облегчает требования к монтажу и обслуживанию инфраструктуры.

Сравнение с системами на базе сверхпроводящих магнитов демонстрирует интересную закономерность. В японских поездах серии L0, использующих низкотемпературные сверхпроводники, полюсное деление составляет 2,1 м, левитация наступает при скорости 80–100 км/ч, а магнитная индукция достигает 4,7 Тл – в четыре раза выше, чем у NdFeB [5]. Таким образом, увеличенное полюсное деление компенсируется четырехкратным ростом индукции, обеспечивая сопоставимую эффективность левитации.

Энергетический анализ показывает, что при использовании постоянных магнитов в режиме магнитодинамической левитации сила подъема F_L и сила электродинамического сопротивления F_D связаны через добротность путевой структуры Q (3).

$$Q = k_{LD} \tag{3}$$

Коэффициент эффективности левитации k_{LD} на участке разгона может достигать значений 10–15, то есть подъемная сила в десять раз превышает силу торможения [5]. Это позволяет разгонять транспортное средство с приемлемыми затратами энергии.

Для грузовых перевозок на магистральных линиях актуален вопрос грузоподъемности. Расчеты и макетные испытания российских разработчиков показали, что левитационная система на постоянных магнитах способна обеспечить подъем нагрузки до 250 кг на погонный метр при левитационном зазоре 10 мм и скорости движения от 30 км/ч [4]. Увеличение грузоподъемности требует либо увеличения числа элементарных магнитов в массиве Хальбаха, либо перехода к гибридным схемам с электромагнитами или ВТСП.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Технические вызовы и направления исследований

Несмотря на очевидные преимущества постоянных магнитов, ряд технических проблем требует дальнейшего изучения.

Первая проблема связана с деградацией магнитных свойств NdFeB при длительной эксплуатации. Воздействие переменных магнитных полей, вибрации, температурных циклов приводит к частичному размагничиванию. Для ВТСП-магнитов ситуация осложняется тем, что при потере криоагента они полностью утрачивают магнитные свойства и требуют повторной активации [9]. Разработка надежных методов диагностики состояния магнитов и технологий их восстановления по месту установки остается актуальной задачей.

Вторая проблема – обеспечение безопасности персонала и пассажиров в условиях воздействия сильных магнитных полей. Измерения на макетах показали, что магнитная индукция в непосредственной близости от массивов Хальбаха может достигать значений, значительно превышающих нормы [13]. Расстояние, на котором воздействие постоянного магнитного поля соответствует регламенту при длительности нахождения до 1 часа, составляет более 20 см от источника. Это требует тщательной проработки компоновки систем экранирования.

Третья задача – снижение стоимости редкоземельных материалов. Магниты NdFeB составляют значительную долю капитальных затрат на создание левитационной системы. Развитие отечественной промышленности редкоземельных металлов может существенно снизить зависимость от импорта и удешевить производство магнитов [11]. Альтернативный путь – замена части постоянных магнитов на ферритовые материалы или оптимизация конфигуций сборок для минимизации расхода NdFeB.

Четвертая область исследований – разработка путевых структур с минимальными потерями на вихревые токи. Применение литцы (многожильного проводника с изолированными жилами) или ламината с поперечными прорезями позволяет снизить начальную скорость левитации до 1 м/с, обеспечивая практически непрерывную левитацию на всем протяжении маршрута [10]. Однако технологическая сложность изготовления и монтажа таких треков остается высокой.

Пятое направление – цифровое моделирование и управление. Современные системы управления магнитным подвесом требуют высокого быстродействия (до 10 кГц) и точности измерения левитационного зазора (погрешность не более 0,1 мм). Разработка алгоритмов предиктивного управления с применением машинного обучения может повысить устойчивость системы и снизить энергопотребление электромагнитов в гибридных схемах.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Заключение

Применение постоянных магнитов для создания подъемной силы в магнитолевитационных поездах представляет собой технологически зрелое и экономически обоснованное решение для транспортных систем с умеренными и высокими скоростями движения.

Ключевые выводы исследования сводятся к следующему. Магниты NdFeB обеспечивают достаточную подъемную силу без потребления электроэнергии, снижая эксплуатационные затраты по сравнению с чисто электромагнитными системами. Массивы Хальбаха позволяют удвоить магнитную индукцию в рабочем зазоре и минимизировать поля рассеяния, что критично для пассажирских перевозок. Гибридные схемы, сочетающие постоянные магниты с электромагнитами или сверхпроводниками, обеспечивают оптимальное сочетание энергоэффективности, массы и надежности.

Магнитодинамическая левитация с постоянными магнитами наиболее перспективна для городского и пригородного транспорта, где требуется левитация на малых скоростях и частые остановки. Для высокоскоростных магистральных линий предпочтительны гибридные системы с ВТСП-материалами, обеспечивающие большие левитационные зазоры и высокую грузоподъемность.

Дальнейшие исследования должны сосредоточиться на повышении долговечности магнитных материалов и эффективных систем экранирования, снижении стоимости редкоземельных компонентов и создании интеллектуальных систем управления левитацией. Интеграция магнитолевитационных линий обеспечит максимальный социально-экономический эффект от внедрения новой транспортной технологии.

References

1. Антонов Ю.Ф., Зайцев А.А. Магнитолевитационная транспортная технология / Под ред. В.А. Гапановича. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. 476 с. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/magnitnaya-levitatsiya-fundamentalnaya-osnova-dlya-sverhskorostnyh-vakuumno-levitatsionnyh-transportnyh-tehnologiy (дата обращения: 10.05.2026).

2. Зайцев А.А., Талашкин Г.Н., Соколова Ю.В. Особенности магнитолевитационной технологии, применяемой на общественном транспорте // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2019. Т. 16. № 3. С. 468-480. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-magnitolevitatsionnoy-tehnologii-primenyaemoy-na-obschestvennom-transporte (дата обращения: 10.05.2026).

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

3. Зименкова Т.С., Казначеев С.А., Краснов А.С. Исследование магнитодинамической левитации и электродинамического торможения грузовой транспортной платформы // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2018. Т. 15. № 4. С. 589-601. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-magnitodinamicheskoy-levitatsii-i-elektrodinamicheskogo-tormozheniya-gruzovoy-transportnoy-platformy (дата обращения: 10.05.2026).

4. Ким К.К., Панычев А.Ю. Обеспечение левитации ротора общепланетарного транспортного средства при помощи постоянных магнитов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2023. Т. 25. № 1. С. 134-144. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/obespechenie-levitatsii-rotora-obscheplanetarnogo-transportnogo-sredstva-pri-pomoschi-postoyannyh-magnitov (дата обращения: 10.05.2026).

5. Козлов С.Ю., Талашкин Г.Н., Соколова Ю.В. Исследование магнитодинамической левитации и электродинамического торможения грузовой транспортной платформы // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2018. Т. 15. № 2. С. 245-256. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-magnitodinamicheskoy-levitatsii-i-elektrodinamicheskogo-tormozheniya-gruzovoy-transportnoy-platformy (дата обращения: 10.05.2026).

6. Магнитный подвес левитационного транспортного средства для комбинированной пассивной путевой структуры / А.Б. Кошелев [и др.] // Universum: технические науки. 2023. № 6(111). С. 68-72. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/magnitnyy-podves-levitatsionnogo-transportnogo-sredstva-dlya-kombinirovannoy-passivnoy-putevoy-struktury (дата обращения: 10.05.2026).

7. Пат. 2683122 C1 Российская Федерация, МПК B60L13/10, B61B13/08. Устройство магнитной левитации и поперечной стабилизации на постоянных магнитах / Зайцев А.А.; заявитель и патентообладатель ООО «Магнитный транспорт». № 2018119755; заявл. 28.05.2018; опубл. 26.03.2019, Бюл. № 9. URL: https://patenton.ru/patent/RU2683122C1 (дата обращения: 10.05.2026).

8. Rongjie Z., Kunlun Z., Ye Y., Xiaolong L. A novel design of electromagnetic levitation system for high-speed maglev train // Chinese Journal of Electronics. 2020. Vol. 29. No. 2. P. 364-370. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/a-novel-design-of-electromagnetic-levitation-system-for-high-speed-maglev-train (дата обращения: 10.05.2026).

9. Смирнов А.Н., Ковалев К.Л., Модестов К.А. Сверхпроводниковые технологии для создания модуля транспортной системы магнитной левитации // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2018. Т. 41. № 3. С. 89-

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

100. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sverhprovodnikovye-tehnologii-dlya-sozdaniya-modulya-transportnoy-sistemy-magnitnoy-levitatsii (дата обращения: 10.05.2026).

10. Соколова Ю.В., Талашкин Г.Н., Зайцев А.А. Пути снижения начальной скорости магнитодинамической левитации // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2017. Т. 14. № 4. С. 654-664. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/puti-snizheniya-nachalnoy-skorosti-magnitodinamicheskoy-levitatsii (дата обращения: 10.05.2026).

11. «Росмаглев» заявил о поддержке Минтрансом проектов создания полигонов магнитной левитации // ROLLINGSTOCK. 2024. 15 апр. URL: https://rollingstockworld.ru/passazhirskij-ps/rosmaglev-zayavil-o-podderzhke-mintransom-proektov-sozdaniya-poligonov-magnitnoj-levitaczii/ (дата обращения: 10.05.2026).

12. Распоряжение Правительства РФ от 19.12.2025 № 3871-р «Об утверждении Концепции научно-технологического развития транспортного комплекса РФ на период до 2035 года». URL: https://bazanpa.ru/pravitelstvo-rf-rasporiazhenie-n3871-r-ot19122025-h6962333/ (дата обращения: 10.05.2026).

13. Смирнов С.А., Смирнова О.Ю. Отечественный магнитолевитационный транспорт: потенциал и перспективы развития // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2023. № 3-4(106-107). С. 28-32. URL: https://rostransport.elpub.ru/jour/article/view/45 (дата обращения: 10.05.2026).

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 621.914

Zavyalov D.M. Improving surface quality during high-speed milling

Повышение качества поверхности при высокоскоростном фрезеровании

Zavyalov D.M.
Student, Group 3MOKM-251
Faculty of Mechanical Engineering and Aerospace Engineering
Voronezh State Technical University
Academic Supervisor:
Kondratyev Mikhail Vyacheslavovich
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Department of Mechanical Engineering Technology
Завьялов Д.М.
студент группы змОКМ-251
факультета машиностроения и аэрокосмической техники
Воронежского государственного технического университета
Научный руководитель:
Кондратьев Михаил Вячеславович
кандидат технических наук, доцент
кафедры технологии машиностроения

Abstract. *This article examines a method for improving surface quality during high-speed milling using Solomon curves. These curves describe a paradoxical effect: after reaching a certain cutting speed threshold, the temperature in the tool-workpiece contact zone decreases rather than increases. This opens the possibility of machining materials under gentle thermal conditions at high productivity. The author analyzes the effect of working in the high-speed zone (beyond the "Solomon threshold") on quality parameters: roughness, microhardness, residual stresses, and the absence of defects such as burns. It is shown that at such speeds, most of the heat is lost with the chips, the part remains cool, and cutting forces are reduced. This allows for a surface with minimal roughness and favorable compressive stresses. Particular attention is paid to the effect of chip thinning and tooling requirements.*

Keywords: *high-speed milling, Solomon curves, surface quality, roughness, residual stresses, chip thinning.*

Аннотация. *В статье рассматривается способ повышения качества обработанной поверхности при высокоскоростном фрезеровании на основе использования кривых Соломона. Данные кривые описывают парадоксальный эффект: после достижения определенного порога скорости резания температура в зоне контакта инструмента и заготовки не растет, а снижается. Это открывает возможность обрабатывать материалы в щадящем тепловом режиме при высокой производительности. Автор анализирует влияние работы в высокоскоростной зоне (за «порогом Соломона») на параметры качества: шероховатость, микротвердость, остаточные напряжения и отсутствие дефектов в виде прижогов. Показано, что при таких скоростях основная часть тепла уходит со стружкой, деталь остается холодной, а силы резания снижаются. Это позволяет получать поверхность с минимальной шероховатостью и благоприятными сжимающими напряжениями. Особое внимание уделено эффекту утонения стружки и требованиям к оснастке.*

Ключевые слова: *высокоскоростное фрезерование, кривые Соломона, качество поверхности, шероховатость, остаточные напряжения, утонение стружки.*

Рецензент: Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

Высокоскоростное фрезирование или Высокоскоростная обработка (High Speed Machining), далее ВСФ - одна из новых, наиболее быстро развивающихся технологий, способная радикально увеличить эффективность обработки. Её отличительная особенность - использование повышенной скорости резания до величины, при которой

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

силы резания уменьшаются, что позволяет вести обработку с увеличенными подачами [1, с. 25].

Теоретическое открытие произошло в 1931 г., когда немецкий физик Карл Соломон запатентовал идею (№523594), что при сверхвысоких скоростях резания температура начинает не расти, а снижаться после прохождения критического максимума. Это заложило физическую основу ВСФ. В дальнейшем первые эксперименты стали проводиться в 1950-ых гг.. В СССР и США проводили баллистические испытания, подтвердившие, что на скоростях 40 000–60 000 м/мин можно получить высокую чистоту поверхности и малый износ инструмента .

В Германии (Дармштадтском университете) с 1979 г. начались комплексные работы по внедрению ВСФ в промышленность. Параллельно появился стандарт HSK (полый конус) для надежного зажима инструмента на высоких оборотах . Промышленное внедрение произошло в 1980–1990-е. Технология получила импульс от авиакосмической промышленности (обработка тонкостенных деталей) и производства пресс-форм, где потребовалось высокое качество поверхности без ручной доводки .

В высокоскоростной обработке теоретическим обоснованием являются кривые Соломона (рис. 1), которые показывают снижение сил резания в некотором диапазоне скоростей. Кривые Соломона имеют три зоны обработки – традиционная, переходная («долина смерти»), высокоскоростная). Но наиболее важным фактором здесь является перераспределение тепла в зоне резания. В данном диапазоне скоростей при небольших сечениях среза масса тепла концентрируется в стружке, не успевая перейти в заготовку - это позволяет производить обработку закаленных сталей, не опасаясь отпуска поверхностного слоя.

Отсюда следует основной принцип ВСО: малое сечение среза, снимаемое с высокой скоростью резания, и соответственно высокие обороты шпинделя и высокая минутная подача (рис. 2). Существует рекомендация, что глубина резания не должна превышать 10% диаметра фрезы, но с разработкой новых многозубых фрез для черновой обработки закаленных сталей изготовители инструмента рекомендуют традиционные глубины резания при сохранении малых шагов (рис. 3).

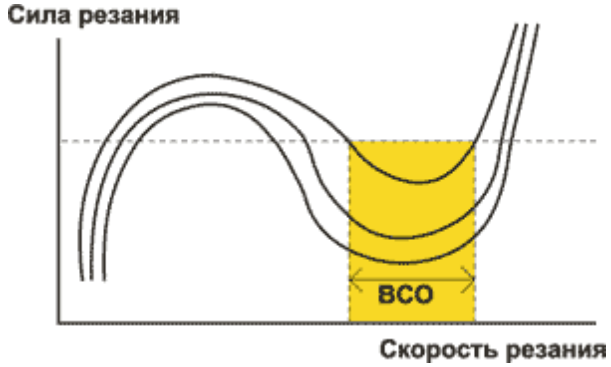


Рисунок №1. Кривые Соломона. Зависимость сил резания от скорости резания

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|



Рисунок №2. Режимы резания для традиционной и высокоскоростной обработки

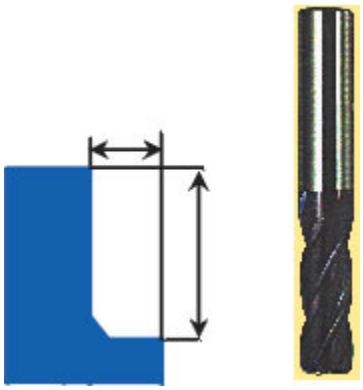


Рисунок №3. Высокоскоростная обработка

Характерными свойствами ВСФ является то, что до 90-95% тепла уходит со стружкой, а деталь остается холодной. При высоких подачах отношение толщины среза к радиусу скругления режущей кромки становится < 1. Резание происходит в зоне «микро-скругления», что требует высокой геометрической остроты инструмента, но снижает тепловую нагрузку на поверхность .

Далее, процесс переходит из квазистатического в динамический. Материал из-за сверхвысоких скоростей деформации ведет себя как более хрупкий (уменьшается пластическая зона), стружка образуется по механизму сдвига, что снижает налипание (нарост) и улучшает микропрофиль поверхности.

Выбор зоны за критическим пиком (правой ветви кривой Соломона) в качестве целевой области для получения высокого качества поверхности базируется на трех взаимосвязанных физических эффектах:

1. Термодинамический фактор (снижение теплового воздействия):

В высокоскоростной зоне большая часть тепла (до 90%) эвакуируется со стружкой. Температура в поверхностном слое детали снижается относительно "пиковых" значений, что предотвращает структурные изменения (прижоги), снимает

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

растягивающие остаточные напряжения и исключает адгезионное схватывание (нарост), которое разрушает микрорельеф.

2. Кинематический фактор (стабилизация сил и виброустойчивость):

При переходе на высокие скорости частота возмущений смещается в область, далекую от собственных частот технологической системы. Это снижает вибрации (исчезает "долина смерти" вибронеустойчивости). Кроме того, снижаются удельные силы резания, что уменьшает упругие деформации в зоне контакта инструмента с заготовкой.



Рисунок № 4. Качество поверхности при возникновении вибрации

3. Масштабный фактор (утончение стружки):

При сохранении минутной подачи, но росте скорости, толщина среза, приходящаяся на один зуб, становится меньше радиуса скругления режущей кромки. Это приводит к работе в режиме микросрезания и "выглаживания", что напрямую снижает параметры шероховатости (Ra, Rz).

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Высокоскоростная зона кривой Соломона обеспечивает синергию снижения температуры, гашения вибраций и уменьшения микронеровностей, что гарантирует получение поверхности высокого качества.

Параметрами качества поверхности являются:

1) Шероховатость (Ra, Rz) - при ВСФ снижается высота микронеровностей за счет малой толщины среза и гашения вибраций. Ra часто достигает значений 0.2–0.4 мкм, что приближает процесс к чистовому шлифованию;

2) Микротвердость - из-за отсутствия сильного тепловыделения и высокой скорости деформации поверхностный слой упрочняется (наклеп) без пережога, что повышает микротвердость на 10–30% относительно сердцевины;

3) Остаточные напряжения - в высокоскоростной зоне в поверхностном слое формируются сжимающие остаточные напряжения (благоприятные), а не растягивающие. Это кратно повышает усталостную прочность детали;

4) Отсутствие дефектов (прижоги, наросты) - благодаря выносу тепла стружкой температура поверхности остается ниже точек структурных превращений — прижоги исключены. Высокая скорость резания подавляет образование нароста, что гарантирует стабильную чистоту поверхности на всей детали.

В контексте высоких скоростей происходит влияние подачи на зуб (fz) и глубины резания (ap), так называемый эффект "chip thinning" (утонение стружки). При высоких скоростях фактическая толщина стружки становится меньше расчетной подачи на зуб (fz). Это позволяет работать с повышенными табличными подачами, но при этом снижается механическая нагрузка на микрорельеф поверхности. В результате уменьшается высота микровыступов и достигается низкая шероховатость (Ra) без потери производительности.

Высокоскоростная обработка требует минимальных вылетов инструмента и жесткого закрепления заготовки, чтобы вывести собственную частоту системы за пределы частоты возмущения от вращения шпинделя. Это исключает резонанс ("дребезг"), который разрушает поверхность. Глубина резания (ap) при ВСФ обычно мала, что снижает силу резания и сохраняет эту жесткость упругой системы.

Для высокопроизводительной обработки деталей металлорежущий станок по силовой и скоростной характеристикам должен соответствовать возможностям режущего инструмента, а сам инструмент - обладать высокими эксплуатационными свойствами, т.е. обеспечивать требуемую допускаемую скорость резания при заданном периоде стойкости [2, с. 1]. При выборе инструмента для ВСФ ключевыми параметрами становится не просто геометрия, а динамическая балансировка, микроструктура твердого сплава и способность к отводу тепла. Следует отдавать предпочтение мелкозернистым и ультрамелкозернистым твердым сплавам. Для финишной обработки

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

закаленных сталей (HRC 48–62) обязательны покрытия на основе AlTiN или AlCrN (высокая жаростойкость, защита от окисления при нагреве стружкой).

Инструмент должен быть сбалансирован до класса G 2.5 (или выше) при заявленных оборотах. Критически важно балансировать узел целиком (оправка + цанга/термопатрон + фреза + гайка). Раздельная балансировка компонентов не гарантирует точное отсутствие дисбаланса в собранном виде из-за допусков посадки. Необходимы фрезы с переменным шагом зуба - это гасит вибрации (гармоники), неизбежные на высоких оборотах (10 000–40 000 об/мин). Также можно использовать инструмент с конической шейкой (конус Морзе) вместо цилиндрической, если есть такая опция. Для глубоких полостей можно использовать цанги с гайкой для высоких оборотов.

Для ВСФ предпочтительны инструменты с радиусом при вершине (R), а не острым углом. Это распределяет тепловую нагрузку и предотвращает микросколы при точечном контакте на высоких подачах. Обязательно использовать гидравлические или термоцанговые оправки, так как стандартные цанги ER на оборотах выше 12 000–15 000 об/мин часто вносят дисбаланс и биение, которое убивает дорогой инструмент за секунды.

Режущая часть может быть представлена следующими материалами:

- CBN (кубический нитрид бора) - для закаленных сталей (>45 HRC) и чугунов, сохраняет твердость при высоких температурах, работая по правой ветви кривой;

- PKD (поликристаллический алмаз) - для цветных металлов (алюминий) и композитов, обеспечивает идеальную чистоту поверхности благодаря сверхвысокой теплопроводности и износостойкости;

- Мелкозернистые твердые сплавы (субмикронные) - для титана и нержавеющих сталей, тонкое зерно (субмикрон) повышает прочность кромки при утонении стружки.

Также используются многослойные нанокомпозитные покрытия (AlTiN, AlCrN), так как они выполняют функцию теплобарьера. Из-за того, что 90% тепла уходит в стружку, покрытие должно защищать основу инструмента от термоударов и диффузионного износа.

Заготовки для высокоскоростного фрезерования должны соответствовать повышенному классу точности, так как в противном случае дефекты поверхности могут привести к высоким и неравномерным нагрузкам на подсистему шпинделя, что вызовет повышенные вибрации всей системы [3, с. 5].В ВСФ точно отбалансированная оснастка — это обязательное условие, а не опция. Без неё невозможно реализовать преимущества высоких оборотов. На оборотах выше 15 000–20 000 об/мин даже микроскопический дисбаланс превращается в разрушительную центробежную силу. Последствиями дисбаланса являются:

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

- Вибрации и биение - сколы инструмента и низкое качество поверхности;
- Перегрев и ускоренный износ шпинделя;
- Риск вырывания инструмента из цанги на максимальных оборотах.

Для ВСФ существуют разные типы оснастки, но лучше всего поддается балансировке и безопасна на максимальных оборотах - термоцанга. Цельная конструкция, минимальное биение (≤0,003 мм).

Также существуют гидравлическая оправка (хорошее демпфирование вибраций, высокая точность зажима) и цанговые патроны (однако они наименее предпочтительны, так как требуют специальных балансировочных гаек и непригодны для оборотов выше 12 000–15 000 об/мин без индивидуальной балансировки собранного узла).



Рисунок №5. Гидравлическая оправка

Скорость обработки кадров стойкой также критически важна. Стойка должна уметь просчитывать программу вперед на десятки-сотни кадров, чтобы избегать рывков при микротраекториях. Без этого даже мощный станок будет «задумываться» на мелком шаге фрезы, вызывая вибрации и ожоги.

От материалов зависят режимы резания по ним. Рассмотрим режимы для следующих трех материалов:

- Алюминий - скорость резания 500–800 м/мин, глубина резания 0,5–2 мм, ширина 5–15% диаметра, подача на зуб 0,05–0,2 мм. Алюминий хорошо поддается ВСФ, позволяет работать на максимальных оборотах с высокими подачами;

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|



Рисунок №6. Пример обработки алюминия при помощи высокоскоростного фрезерования

- Закаленная сталь - скорость резания 100–250 м/мин (с покрытием AlTiN/AlCrN), глубина резания 0,1–0,5 мм, ширина 3–10% диаметра, подача на зуб 0,02–0,08 мм. Главное ограничение — теплостойкость инструмента и жесткость системы;

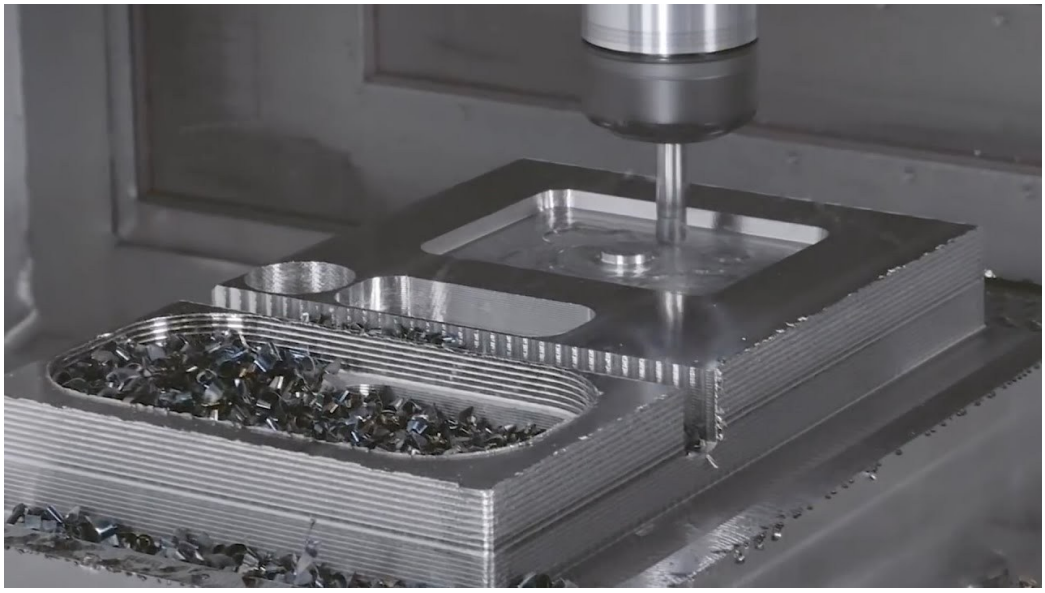


Рисунок №7. Изготовление пресс формы из закаленной стали

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

- Нержавеющая сталь - скорость резания 60–150 м/мин, глубина резания 0,2–0,8 мм, ширина 5–12% диаметра, подача на зуб 0,02–0,06 мм. Требуется снижать подачи из-за налипания и высокой вязкости материала.

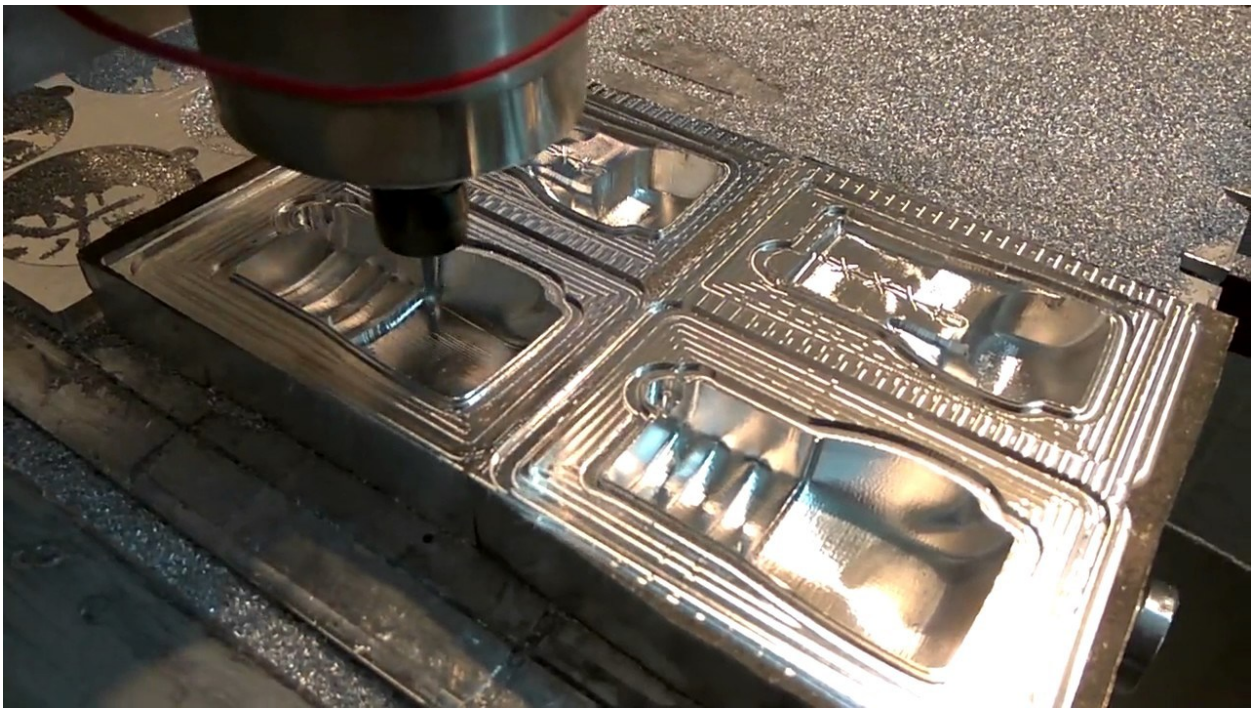


Рисунок №8. Изготовление пресс формы из нержавеющей стали

Во время металообработки движения должны быть скругленными, резкие углы и пилообразные движения исключены. Траектория постоянно сглаживается, инструмент не останавливается в углах, а движется по дуге, что предотвращает «врезание» (врезку) в материал и скачки нагрузки на шпиндель. Используются стратегии трохоидального фрезерования или постоянного радиального врезания. Инструмент движется петлями или спиралями, срезая материал тонкой, но постоянной стружкой, а не врезаясь всей шириной фрезы. Такие траектории позволяют работать на максимальных оборотах шпинделя с высокой подачей, отводя тепло со стружкой, снижая вибрации и продлевая срок службы инструмента.

Следовательно, можно сделать вывод о том, что ВСФ является эффективным методом повышения качества обработанной поверхности. Достижение высокой шероховатости (Ra) и отсутствия дефектов становится возможным благодаря переходу от силового резания к термопластическому, что снижает вибрации и деформации. Подтверждено, что ключевыми факторами являются оптимизация геометрии инструмента, поддержание радиального биения на минимальном уровне и выбор

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

режимов резания (особенно отношения шага к радиусу фрезы). Применение данной технологии позволяет минимизировать или исключить финишные доводочные операции, обеспечивая требуемую точность и эксплуатационную стойкость деталей.

References

1. Оленин Л. Д., Очкин Д. И. О некоторых особенностях фрезерования в режиме высокоскоростной обработки (ВСО) // Известия МГТУ «МАМИ. – 2014. – № 3. – С. 30.

2. Туромша В.И. Скоростное силовое фрезирование // ВЕСТНИК ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА. – 2012. – Серия В. – С. 9.

3. Присевок А.Ф., Каштальян И.А., Клавсуть П.Н. Повышение эффективности процесса высокоскоростного фрезерования сложнопрофильных деталей // С. 7

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

CONCLUSION

The articles published in issue №6(2.2) of the «International Journal of Professional Science» confirm the increasing role of interdisciplinary research in solving practical and theoretical problems of contemporary science. The diversity of topics demonstrates that innovation today emerges at the intersection of medicine, engineering, information technologies, materials science, industrial production, and transport systems.

The medical studies presented in the issue contribute to a deeper understanding of physiological processes, clinical risks, patient-centered treatment outcomes, and digital transformation in healthcare. At the same time, the works devoted to artificial intelligence, neural networks, observability of software platforms, cyberphysical systems, and intelligent diagnostic solutions show how advanced technologies are reshaping professional practice and expanding the possibilities of analysis, prediction, and decision-making.

Engineering and transport research emphasize the importance of safety, reliability, resource efficiency, and modernization of infrastructure. Studies on unmanned aerial vehicles, flight anomaly assessment, steel structure deterioration, high-speed milling, geopolymer composites, and magnetic levitation technologies provide valuable insights for both applied implementation and further scientific development.

The editorial board expresses its gratitude to all authors for their contribution to the advancement of professional science. We hope that the materials of this issue will be useful to researchers, engineers, medical specialists, educators, and practitioners, and will encourage further interdisciplinary cooperation aimed at creating effective, sustainable, and technologically advanced solutions.

With best wishes and warm regards,
Editor-in-Chief
International Journal of Professional Science
Krasnova N.A.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Electronic scientific editions

International journal of Professional Science

international scientific journal
№6(2.2)/2026

Please address for questions and comments for publication as well as suggestions for cooperation to e-mail address mail@scipro.ru

ISSN 2542-1085

Format 60x84/16. Conventional printed sheets 12,2
Circulation 100 copies
Scientific public organization
“Professional science”