

ISSN 2223-2966



СОВРЕМЕННАЯ НАУКА:
АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ

ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

№ 11 2024 (НОЯБРЬ)

Учредитель журнала
Общество с ограниченной ответственностью
«НАУЧНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Журнал издается с 2011 года.

Редакция:

Главный редактор
А.В. Царегородцев
Выпускающий редактор
Ю.Б. Миндлин
Верстка
М.А. Комарова

Подписной индекс издания
в каталоге агентства «Пресса России» — 80016
В течение года можно произвести подписку
на журнал непосредственно в редакции.

Издатель:

Общество с ограниченной ответственностью
«Научные технологии»

Адрес редакции и издателя:
109443, Москва, Волгоградский пр-т, 116-1-10
Тел/факс: 8(495) 142-8681

E-mail: redaktor@nauteh.ru
<http://www.nauteh-journal.ru>

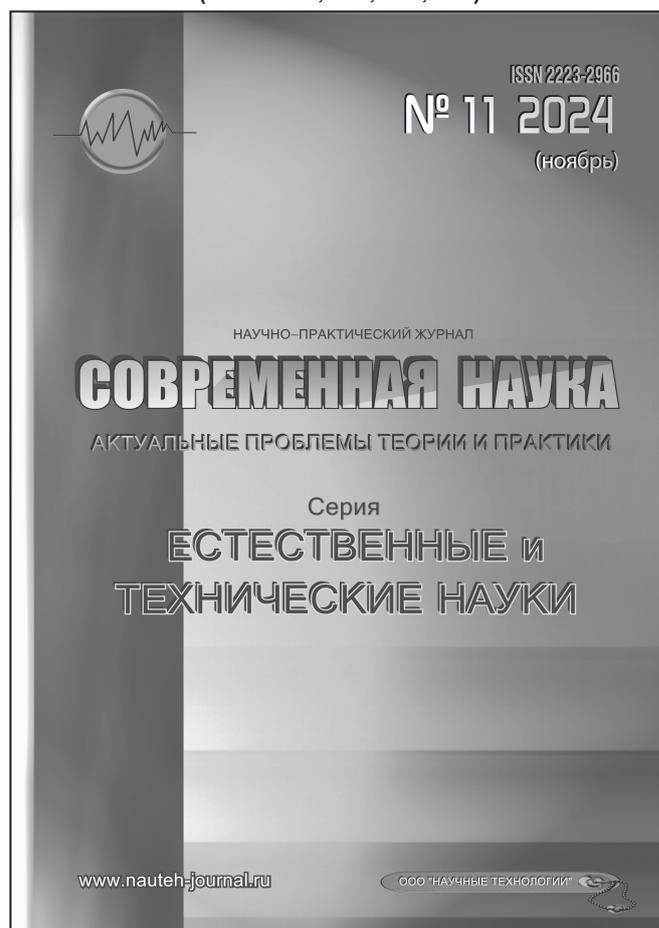
Журнал зарегистрирован Федеральной службой
по надзору в сфере массовых коммуникаций,
связи и охраны культурного наследия.

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77-44912 от 04.05.2011 г.

Научно-практический журнал

Scientific and practical journal

(ВАК — 1.1.2, 1.5.x, 2.3.x, 3.1.x)



В НОМЕРЕ:

ОБЩАЯ БИОЛОГИЯ, ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ,
КЛИНИЧЕСКАЯ МЕДИЦИНА

Авторы статей несут полную ответственность
за точность приведенных сведений, данных и дат.

При перепечатке ссылка на журнал
«Современная наука»

Актуальные проблемы теории и практики» обязательна.

Журнал отпечатан в типографии
ООО «КОПИ-ПРИНТ» тел./факс: (495) 973-8296

Подписано в печать 13.11.2024 г. Формат 84x108 1/16
Печать цифровая Заказ № 0000 Тираж 2000 экз.

ISSN 2223-2966



Редакционный совет

Атаев Алевдин Рашитханович — д.м.н., профессор, Дагестанский государственный медицинский университет

Безруких Марьям Моисеевна — д.б.н., профессор, Институт возрастной физиологии РАО

Бекетов Сергей Валериевич — д.б.н., ФГБНУ НИИ Пушного звероводства и кролиководства имени В.А. Афанасьева

Белых Владимир Иванович — Д.м.н., доцент, Алтайский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации

Грачев Николай Николаевич — доктор высшей степени в области технических наук (DoctorHabilitatus), профессор, Московский государственный институт электроники и математики НИУ ВШЭ (технический университет)

Гусева Анна Ивановна — д.т.н., профессор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Зубкова Валентина Михайловна — д.б.н., профессор, Российский государственный социальный университет

Каллаев Нажмудин Омаркадиевич — д.м.н., профессор, Дагестанский государственный медицинский университет

Квасов Андрей Иванович — д.т.н., профессор, Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикабаева

Корнеев Андрей Матиславович — д.т.н., профессор, Липецкий государственный технический университет

Корягина Наталья Александровна — д.м.н., доцент, Пермский государственный медицинский университет им. ак. Е.А.Вагнера Министерства здравоохранения Российской Федерации

Кравец Бронислава Борисовна — д.м.н., профессор, Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко Министерства здравоохранения Российской Федерации

Кулик Сергей Дмитриевич — д.т.н., доцент, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Матвеев Всеволод Борисович — д.м.н., профессор, ФГБУ РОНЦ им. Н.Н. Блохина, член-корреспондент РАН

Миндлин Юрий Борисович — к.э.н., доцент, Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии им. К.И. Скрябина

Надежкин Сергей Михайлович — д.б.н., профессор, Всероссийский НИИ селекции и семеноводства овощных культур Россельхозакадемии

Овезов Алексей Мурадович — д.м.н., доцент, ГБУЗ МО Московский областной научно-исследовательский клинический институт им. М.Ф. Владимирского

Олейникова Светлана Александровна — д.т.н., доцент, Воронежский государственный технический университет

Рахимов Ильгизар Ильясович — д.б.н., профессор, Казанский (Приволжский) федеральный университет

Ромашкова Оксана Николаевна — д.т.н., профессор, Московский городской педагогический университет

Симаков Юрий Георгиевич — д.б.н., профессор, Московский государственный университет им. К.Г. Разумовского (ПКУ)

Симоненков Алексей Павлович — д.м.н., профессор, независимый эксперт

Трапезов Олег Васильевич — д.б.н., в.н.с., ФИЦ «Институт цитологии и генетики СО РАН»

Федорова Оксана Ивановна — д.б.н., доцент, Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии им. К.И. Скрябина

Харитонов Михаил Анатольевич — д.м.н., профессор, Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова

Царегородцев Анатолий Валерьевич — д.т.н., профессор, Московский государственный лингвистический университет redaktor3@nauteh.ru

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

Общая биология

Ерофеевская Л.А., Кычкин А.К., Салтыкова А.Л., Вит А.А. — Мониторинг микроорганизмов открытой экосистемы Якутской станции низкотемпературных испытаний
Erofeevskaya L., Kychkin A., Saltykova A., Vit A. — Monitoring of microorganisms in the open ecosystem of the Yakutsk low-temperature testing station7

Чжу Куньхао — Ремедиационное влияние райграса на органическое загрязнение горнодобывающих территорий
Zhu Kunhao — Remediation effect of ryegrass on organic pollution of mining areas14

Шао Чэнъюе, Евтушенков А.Н. — Молекулярно-генетический анализ *Pectobacterium brasiliense*, выделенного из образцов растений в Беларуси
Shao Chengyue, Yevtushenkov A. — Molecular genetic analysis of *pectobacterium brasiliense* isolated from plant samples in Belarus19

Информатика, вычислительная техника и управление

Алтынников М.С. — Преимущества перехода на систему электронного документооборота на основе технологии Blockchain в высшем учебном заведении
Altynnikov M. — Power planetary electric drives for lock bodies of pipeline transport26

Боярский Г.Г., Черный Д.Ю. — Использование данных окулографии при проектировании человеко-машинного интерфейса
Boyarsky G., Cherny D. — Using eye-tracking data in human-machine interface design31

Бушманов А.В., Ложкова А.А. — Влияние звукоизоляции ограждающих конструкций на разборчивость речи
Bushmanov A., Lozhkova A. — The effect of sound insulation of enclosing structures on speech intelligibility39

Ветошкин Н.В. — Моделирование применения комплексного искусственного интеллекта в дальнем граничном слое гетерогенной распределенной системы
Vetoshkin N. — Modeling the application of complex artificial intelligence in the far edge layer of a heterogeneous distributed system44

Высоцкий Р.Н., Демичев В.А. — Синтезирование видео с помощью вариационного автоэнкодера и генеративно-состязательной модели
Vysotsky R., Demichev V. — Generation of synthetic videos according to the necessary parameters51

Егорчев А.А., Гимадутдинов Р.М., Фахрутдинов А.Ф., Чикрин Д.Е., Аганов А.В., Павельев М.Н. — Методы распознавания кончиков астроцитов на микроскопических снимках
Egorchev A., Gimadutdinov R., Fahrutdinov A., Chikrin D., Aganov A., Paveliev M. — Methods for recognizing astrocyte tips in microscopic images56

Камышанов Д.Э. — Влияние технологий блокчейн на управление цепями поставок
Kamyshanov D. — The impact of blockchain technologies on supply chain management64

Камышанов Д.Э. — Применение интеллектуальных систем поддержки принятия решений в современной системе здравоохранения
Kamyshanov D. — Application of intelligent decision support systems in the modern healthcare system69

Копыльцов В.Ю. — Асинхронный разностно-дальномерный алгоритм позиционирования беспилотного летательного аппарата в условиях отсутствия сигналов глобальной спутниковой навигационной системы
Kopyltsov V. — Asynchronous differential-range algorithm for positioning an unmanned aerial vehicle in the absence of global satellite navigation system signals75

- Копыльцов В.Ю.** — Суммарно-дальномерная модель позиционирования комплекса радиотехнического контроля на базе беспилотных летательных аппаратов
Kopyltsov V. — Total-range-measuring model of positioning a radio-technical control complex based on unmanned aerial vehicles.82
- Лобаев И.А., Фирсова Т.Ф., Мешалкин Е.А., Кравченко А.Б.** — Соразмерность нормативных требований в области пожарной безопасности при прогнозировании возможного имущественного вреда в случае пожара
Lobaev I., Firsova T., Meshalkin E., Kravchenko A. — Proportionality of regulatory requirements in the field of fire safety in forecasting possible property damage in the event of a fire.90
- Медуницкий В.М., Сержантова М.В.** — Особенности взаимодействия человека с робототехнической системой в производственном процессе
Medunetsky V., Serzhantova M. — Features of human interaction with a robotic system in the production process 103
- Нуякшин М.Г.** — Архитектура системы подготовки к олимпиадам на основе больших данных
Nuyakshin M. — Architecture of an Olympiad preparation system based on big data. 108
- Пантюхин А.М., Гладун В.В., Малинин И.И., Молодяков С.А.** — Реализация программной системы анализа данных на основе ELK-стека
Pantukhin A., Gladun V., Malinin I., Molodyakov S. — Implementation of a Data Analysis Software System Based on the ELK Stack. 114
- Пантюхин А.М., Гладун В.В., Малинин И.И., Молодяков С.А.** — Разработка приложения для автоматизации переноса музыкальной библиотеки между сервисами
Pantukhin A., Gladun V., Malinin I., Molodyakov S. — Development of an application for automating the transfer of music libraries between services 120
- Петрунина А.Э., Цыганков Н.С., Москалев А.К.** — Оптимизация производственных процессов в организационных системах предприятий аддитивной отрасли
Petrunina A., Tsygankov N., Moskalev A. — Optimization of production processes in organizational systems of enterprises in the additive industry..... 127
- Решетников Д.Д., Иванов Е.А., Амелютин Е.В., Селин А.А.** — Алгоритм обнаружения внутренних угроз в информационной системе
Reshetnikov D., Ivanov E., Amelyutin E., Selin A. — Algorithm for detecting internal threats in information system..... 135
- Рогожкин В.А.** — Оптимизация индивидуальной профилактической работы участковых уполномоченных полиции: проблемы и перспективы
Rogozhkin V. — Optimization of individual preventive work of district police officers: problems and prospects 140
- Рыбак А.В.** — Системный анализ и проблема кадрового обеспечения органов внутренних дел
Rybak A. — System analysis and the problem of staffing of internal affairs bodies 144
- Сабинин О.Ю., Турусов Р.А., Чуприна Р.В.** — Исследование эффективности применения ассоциативных правил для извлечения знаний из данных сетевого трафика в целях обеспечения кибербезопасности
Sabinin O., Turusov R., Chuprina R. — Research on the effectiveness of associative rules for extracting knowledge from network traffic data for cybersecurity purposes..... 150
- Фан Цзивэнь, Ван Гуюе, Ван Цзэдун, Цзоу Линьюй** — Создание информационной системы для контроля и мониторинга состояния оборудования ТЭЦ
Fang Jiwen, Wang Guyue, Wang Zedong, Zou Lingyu — Creation of an information system for control and monitoring of the condition of CHPP equipment 156
- Хаков Е.М.** — Применение технологии искусственного интеллекта в процессах принятия управленческих решений
Khakov E. — The use of artificial intelligence technology in management decision-making processes 161

- Хаков Е.М.** — Анализ данных как инструмент совершенствования процессов
Khakov E. — Data analysis as a tool for process improvement 166
- Хомутинников М.А.** — Использование технологий искусственного интеллекта в современных CRM-системах
Khomutinnikov M. — The use of artificial intelligence technologies in modern CRM systems..... 170
- Чуваков А.В., Боряев Р.О.** — Проектирование информационной системы поддержки принятия факторинговых решений
Chuvakov A., Boryaev R. — Designing an information system to support factoring decisions..... 176
- Шипулин Г.Ф., Приймак А.Е.** — Использование техник спайдеринга и скрапинга при оценке состояния защищенности веб-приложений
Shipulin G., Priymak A. — Using Spidering and Scraping Techniques in Assessing the Security Status of Web Applications 185
- Клиническая медицина
- Арсаханова Г.А.** — Влияние длительного гипоксического воздействия на ультраструктурную организацию кардиомиоцитов
Arsakhanova G. — The effect of prolonged hypoxic exposure on the ultrastructural organization of cardiomyocytes 188
- Бархатов И.В., Бархатова Н.А., Бархатова Е.И.** — Особенности перфузии слизистой при атрофическом колите неангиогенной природы
Barkhatov I., Barkhatova N., Barkhatova E. — Features of mucosa perfusion in atrophic colitis of non-angiogenic nature..... 194
- Грачева Е.П., Штраус В.А., Грачев В.А.** — Психика больных, страдающих хроническим бронхитом
Gracheva E., Strauss V., Grachev V. — The psyche of patients suffering from chronic bronchitis 199
- Карасев И.А.** — Анализ образцов микробного состава ободочной кишки и стула у пациентов с аденомами и колоректальным раком
Karasev I. — Analysis of colonic and stool microbial composition samples from patients with adenomas and colorectal cancer 202
- Котельникова Н.А., Балтер Р.Б., Целкович Л.С., Иванова Т.В., Ильченко О.А., Пугачева Т.А.** — Своеобразие микробиоты полости матки у женщин с гиперпластическими процессами эндометрия
Kotelnikova N., Balter R., Tselkovich L., Ivanova T., Ilchenko O., Pugacheva T. — Features of the microbiota of the uterine cavity in women with endometrial hyperplastic processes..... 209
- Кочетова Е.В.** — Минеральная плотность костной ткани и диффузионная способность легких у больных хронической обструктивной болезнью легких
Kochetova E. — Bone mineral density and lung diffusing capacity in patients with chronic obstructive pulmonary disease 214
- Лузина Ф.А., Дорошилова А.В., Палевская С.А., Жукова А.Г., Гуляева О.Н., Казицкая А.С., Ядыкина Т.К., Иванова Т.В., Ильченко О.А.** — Ассоциация генов детоксикации ксенобиотиков *gstt1* и *gstm1* с невынашиванием беременности у женщин шорской национальности Кемеровской области — Кузбасс
Luzina F., Doroshilova A., Palevskaya S., Zhukova A., Gulyaeva O., Kazitskaya A., Yadykina T., Ivanova T., Ilchenko O. — Association of genes for detoxification of xenobiotics *gstt1* and *gstm1* with miscarriage in women of Shor nationality of the Kemerovo region — Kuzbass 218
- Максимчук И.И., Пономарёва М.И.** — Применение субэпителиального соединительнотканного трансплантата для закрытия рецессий десны
Maksimchuk I., Ponomareva M. — The use of a subepithelial connective tissue graft to close gum recessions..... 226
- Муратова С.Б.** — Подходы к коррекции липидного обмена в профилактике и лечении сердечно-сосудистых заболеваний
Muratova S. — Approaches to correction of lipid metabolism in the prevention and treatment of cardiovascular diseases 231
- Полиданов М.А., Сулаев Е.В., Масляков В.В., Капралов С.В., Прохницкий А.В., Сафронов Д.В.** — Аугментационная маммопластика: история развития, возможные осложнения и рекомендации

<i>Polidanov M., Sulaev E., Maslyakov V., Kapralov S., Prokhmitsky A., Safronov D.</i> — Augmentation mammoplasty: history of development, possible complications, and recommendations.	236
Роцин Е.М. — Виртуальное планирование и навигационная имплантология: точность, эффективность, клинические преимущества <i>Roshchin E.</i> — Virtual planning and navigation implantology: accuracy, efficiency, clinical benefits	239
Роцин Е.М. — Дентальная трибология: исследование износа и биосовместимости современных ортопедических материалов <i>Roshchin E.</i> — Dental tribology: the study of wear and biocompatibility of modern orthopedic materials	245
Селезнева А.В., Фатьянова А.С., Решетов И.В. — Редкие молекулярные нарушения при немелкоклеточном раке легкого и пути их решения в дальнейшем будущем <i>Selezneva A., Fatyanova A., Reshetov I.</i> — Rare molecular abnormalities in non-small cell lung cancer and ways to solve them in the future	250
Султанова О.Э., Чернышева Е.Н., Липницкая Е.А., Исаева С.И., Текеева Г.Д., Шагимов Н.Е., Султанова С.Ш. — Оценка взаимосвязи между уровнем магния и депрессией у пациентов с острым коронарным синдромом на фоне недифференцированной дисплазии соединительной ткани <i>Sultanova O., Chernysheva E., Lipnitskaya E., Isaeva S., Tekeeva G., Shagimov N., Sultanova S.</i> — Assessment of the relationship between magnesium levels and depression in patients with acute coronary syndrome on the background undifferentiated dysplasia connective tissue	254
Токаев Т.К., Штыхно А.О., Бикбаев А.С., Токаев В.К., Синицын М.В. — Применение наночастиц серебра в лечении туберкулеза <i>Tokaev T., Shtykhno A., Bikbaev A., Tokaev V., Sinitsyn M.</i> — The use of silver nanoparticles in the treatment of tuberculosis	260
Хлыстунов С.А. — Особенности хирургического лечения абдоминальных грыж роботизированным методом <i>Khlystunov S.</i> — Characteristics of surgical treatment of abdominal hernias by robotic method	267
Наши авторы	271

МОНИТОРИНГ МИКРООРГАНИЗМОВ ОТКРЫТОЙ ЭКОСИСТЕМЫ ЯКУТСКОЙ СТАНЦИИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ¹

MONITORING OF MICROORGANISMS IN THE OPEN ECOSYSTEM OF THE YAKUTSK LOW-TEMPERATURE TESTING STATION

**L. Erofeevskaya
A. Kychkin
A. Saltykova
A. Vit**

Summary. In the modern scientific context, the relevance and significance of the study of microbiological aspects of the bio expression of polymer composites, especially in the conditions of the Republic of Sakha (Yakutia), require a thorough scientific analysis and a multifaceted approach. The extreme climatic conditions of this territory can contribute to the accelerated destruction of composite materials under the influence of climatic factors, which, in turn, creates a predisposition to bio-contamination and exacerbates the degradation processes of these materials. The purpose of this work is to analyze the dynamics of changes in the microflora of the environment affecting experimental samples of polymer composites exhibited in the open ecosystem of the low-temperature testing station located in the city of Yakutsk. As a result of the conducted microbiological studies, significant data were obtained on the structure and dynamics of microbial communities on the territory of the station. These data indicate that certain changes are observed in the composition and level of contamination of samples in an open ecosystem, which are probably due to the influence of various biotic and abiotic factors. Among such factors, it is possible to distinguish the circulation of various groups of microorganisms in the environment, as well as the level of humidity and the availability of nutrients necessary for the vital activity of microorganisms. The obtained results emphasize the importance of an integrated approach to studying the interaction of microflora with polymer composite materials in extreme climate conditions, which opens new horizons for further research in this area.

Keywords: polymer composite materials, biodegradation, microorganisms, mold fungi, environment, ecotopes.

Ерофеевская Лариса Анатольевна

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа СО РАН (обособленное подразделение) Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирское отделение Российской академии наук»
lora-07.65@mail.ru

Кычкин Анатолий Константинович

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН (обособленное подразделение) ФГБНУ Федеральный исследовательский центр, «Якутский научный центр Сибирское отделение Российской академии наук»
kychkinplasma@mail.ru

Салтыкова Анастасия Леонидовна

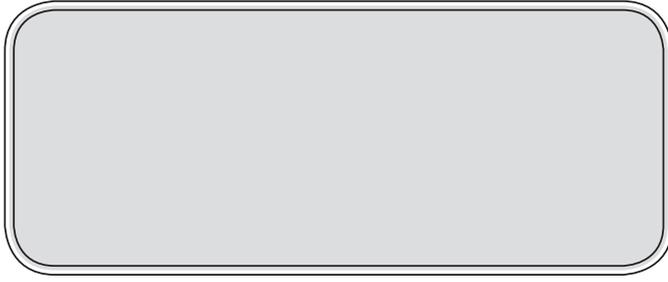
аспирант, младший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирское отделение Российской академии наук»
ny97@mail.ru

Вит Алина Александровна

аспирант, инженер, Институт проблем нефти и газа СО РАН (обособленное подразделение), Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирское отделение Российской академии наук»
alina_vit@list.ru

Аннотация. В современном научном контексте актуальность и значимость исследования микробиологических аспектов биопоражения полимерных композитов, особенно в условиях Республики Саха (Якутия), требуют основательного научного анализа и многогранного подхода. Экстремальные климатические условия данной территории могут способствовать ускоренному разрушению композитных материалов под воздействием климатических факторов, что, в свою очередь, создает предрасположенность к биозагрязнению и усугубляет процессы деградации этих материалов. Целью данной работы является анализ динамики изменений микрофлоры окружающей среды, влияющей на экспериментальные образцы полимерных композитов, экспонируемых в открытой экосистеме станции низкотемпературных испытаний, расположенной в городе Якутске. В результате проведенных микробиологических исследований были получены значимые данные о структуре и динамике микробных сообществ на территории станции. Эти данные свидетельствуют о том, что в составе и уровне контаминации образцов, находящихся в условиях открытой экосистемы, наблюдаются определенные изменения, которые, вероятно, обусловлены воздействием различных биотических и абиотических факторов. Среди таких факторов можно выделить циркуляцию разнообразных групп микроорганизмов в окружающую

¹ Работа выполнена при финансировании Государственного задания FWRS-2024–0058 на 2024–2026 гг. на оборудовании ЦКП ЯНЦ СО РАН.



Введение

В современном мире, где использование полимерных композиционных материалов (ПКМ) становится все более распространенным, вопросы исследования биопоражения этих материалов приобретают важное значение. Несмотря на свои технические преимущества, ПКМ, как и любые материалы подвержены биологическому повреждению, что негативно сказывается на их эксплуатационных характеристиках и долговечности. Важным аспектом исследования является изучение механизмов биологического повреждения ПКМ, что включает в себя анализ изменений химического состава образцов до и после воздействия биологического заражения. Особенно актуальной и значимой задачей, требующей глубокого научного анализа и комплексного подхода, является изучение микробиологических аспектов биопоражения полимерных композитов в условиях Республики Саха (Якутия). Суровый климат и уникальные особенности окружающей среды (ОС) региона могут способствовать интенсивному разрушению композитов под воздействием климатических факторов, что, в свою очередь, может создавать условия для биозагрязнения материалов и усугублять процесс деградации ПКМ.

Цель работы заключается в изучении динамики изменений микрофлоры объектов ОС, которые оказывают влияние на экспериментальные образцы ПКМ, экспонируемых в условиях открытой экосистемы станции низкотемпературных испытаний.

Материалы и методы

Материалом для исследований служили опытные образцы гибридных ПКМ, изготовленных на основе стекловолокна, базальтового волокна и углеродного волокна. Также в качестве объектов ОС были изучены почва, снежный покров и атмосферный воздух.

Отбор проб и пробоподготовка выполнены в соответствии с общепринятыми в микробиологии методиками [1, С. 172–185; 2, С. 56–61; 3, С. 50–53; 4, С. 138–148; 5, С. 158–160; 6, С. 135–140].

КМАФАнМ (количество мезофильных аэробных и анаэробных микроорганизмов) и общую численность

щей среде, а также уровень влажности и доступность питательных веществ, необходимых для жизнедеятельности микроорганизмов. Полученные результаты подчеркивают важность комплексного подхода к изучению взаимодействия микрофлоры с полимерными композиционными материалами в условиях экстремального климата, что открывает новые горизонты для дальнейших исследований в этой области.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, биodeградация, микроорганизмы, плесневые грибы, окружающая среда, экотопы.

гетеротрофных бактерий определяли методом культивирования на мясопептонном агаре (МПА) после инкубации в стационарных условиях при (t) +30(±1)°C в течение 72 ч. — для КМАФАнМ и при (t) +37(±1)°C в течение 24 ч. — для гетеротрофов. Для культивирования плесневых грибов и дрожжей использовали агар Чапека и среду Сабуро. Для актинобактерий (микроорганизмов, занимающих промежуточное положение между грибами и бактериями) использовали крахмал-аммиачный агар (КАА). Для азотфиксирующих и олиготрофных бактерий использовали среду Эшби. Целлюлозолитические бактерии изучали на средах Гетчинсона и Клейтона. Угледородородокисляющие микроорганизмы выделяли методом накопительных культур на минеральной среде Мюнца.

Результаты микробиологических исследований выражали в КОЕ/г АСВ (колониеобразующих единицах на 1 грамм абсолютно сухого веса) почвы или донных отложений (ДО) или в КОЕ/см³ воды.

Идентификацию микроорганизмов осуществляли по общепринятым в микробиологии методам [7, 429 с.].

Микробиологические исследования проводились с определенной периодичностью на протяжении всего периода экспозиции (осень, зима, весна, лето). Общая продолжительность мониторинга составила семь лет, охватывая период с 2018 по 2024 гг.

В работе использованы: лабораторный поляризованный микроскоп AxiolabPol, производство фирмы «Карл Цейсс» Германия с увеличением до x130000 ед. Биологический микроскоп «Biomed-3» с увеличением до x1000 крат. Растровый электронный микроскоп JEOLJSM-7800F с диапазоном увеличений — от x25 до x1000000.

Результаты исследований

В ходе микробиологического мониторинга установлено, что в период с 2018 по 2020 годы на поверхностях ПКМ, экспонируемых в условиях открытой экосистемы станции низкотемпературных испытаний в городе Якутске наблюдалось преобладание бактериальной флоры, содержание которой существенно превышало уровень плесневых грибов и актинобактерий на один-два порядка. В 2021 г. в составе микрофлоры произошло зна-

чительное изменение, в результате которого плесневые грибы стали доминирующей группой микроорганизмов. Данная тенденция сохранялась вплоть до 2024 г. (рис. 1).

Вероятными причинами указанных изменений могут являться разнообразные факторы ОС включая трансформации в составе загрязняющих веществ почвы и атмосферного воздуха, а также влияние внешних контаминационных факторов. Кроме того, определенные абиотические параметры, такие как изменение уровня влажности и влияние солнечной радиации могли существенно влиять на микрофлору. Согласно данным климатического монитора (http://www.pogodaiklimat.ru/history/24959_2.htm), наблюдается, что увеличение суммы среднегодовых осадков произошло в период с 2021 по 2023 гг. (рис. 2). Данная информация может свидетельствовать о тесной взаимосвязи между климатическими изменениями и динамикой микробного состава ПКМ.

Основываясь на результатах проведенного мониторинга изменений в составе микрофлоры, можно сформулировать гипотезу о том, что осадки влияют на уровень влагопоглощения ПКМ, что, в свою очередь, способствует развитию плесневых грибов на их поверхностях.

Показано (табл. 1), что в течение всего периода мониторинга наблюдалось наличие разнообразия видов плесневых грибов, среди которых доминировали представители pp. *Aspergillus* (*A. fumigatus*, *A. niger*), *Penicillium* (*P. chrysogenum*, *P. aurantiogriseum*, *P. rubens*), *Rhizopus* (*R. oryzae*), *Chaetomium* (*C. globosum*), *Fusarium* sp. и *Scopulariopsis* (*S. brevicaulis*) и бактерий pp. *Bacillus*, *Serratia*, *Brevundimonas*, *Pseudomonas*.

Штаммы, обладающие наибольшей деградирующей способностью по отношению к органическим компонентам ПКМ и углеводов исследованы с применением генетического анализа.

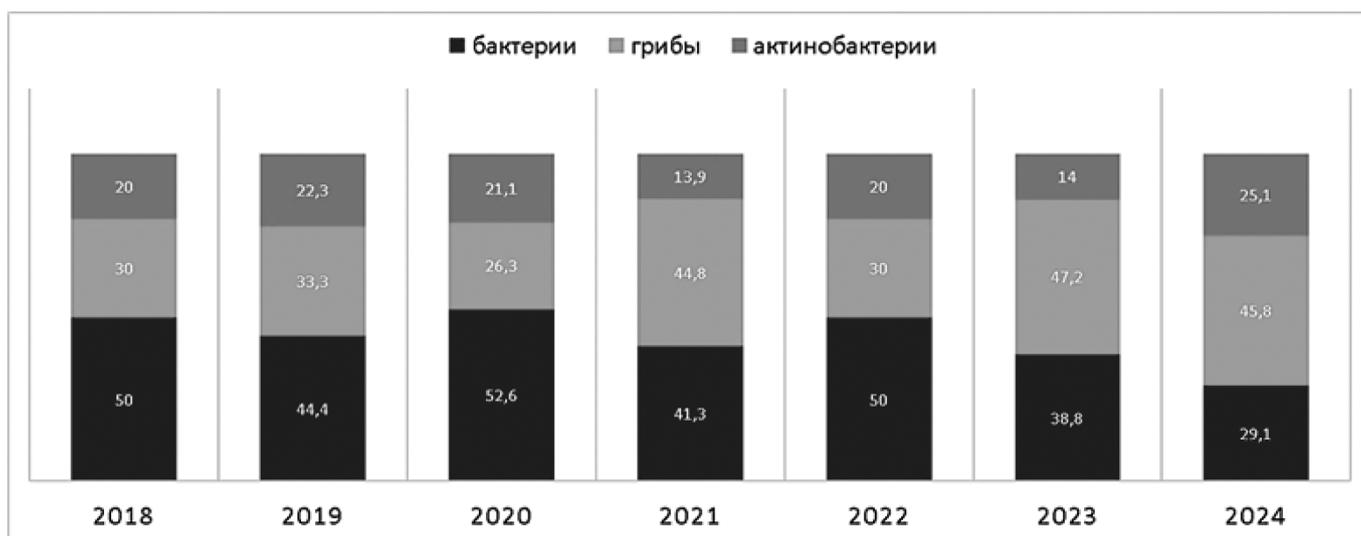


Рис. 1. Динамика изменения микробного пейзажа на поверхностях ПКМ, экспонируемых в условиях открытой экосистемы станции низкотемпературных испытаний

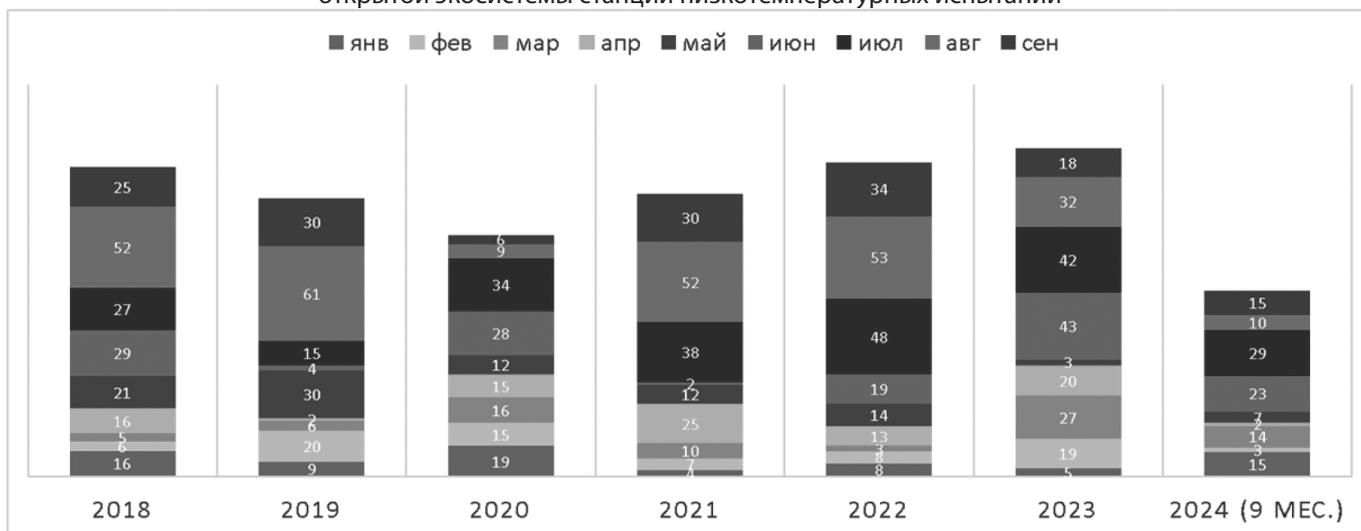


Рис. 2. Годовые суммы выпавших осадков в Якутске за 7 лет

1. Штамм ПКИ-12Л_1492_В_восемь. сег-Г.

Филогенетический анализ родства штамма ПКИ-12Л, выполненный на основе типовых штаммов близкородственных бактерий с учётом их физиологических характеристик, продемонстрировал, что наибольшую близость к исследуемому штамму ПКИ-12Л проявляет вид из домена Bacteria, относящийся к филуму Proteobacteria, классу Alphaproteobacteria, порядку Caulobacterales, семейству Caulobacteraceae и роду *Brevundimonas*.

Результаты анализа секвенсов, выполненного с использованием компьютерной программы, доступной на платформе RDB II (Ribosomal Database Project II), которая предназначена для исследования родословных связей микроорганизмов и построения филогенетических деревьев, представлена в графическом формате:

S000543524-not_calculated-0.942-0913-uncultured bacterium; OTU-30; AB220007

S000583832-not_calculated-0.948-0905-*Brevundimonas* sp. w-1; DQ104428

S000640172-not_calculated-0.957-0460-uncultured bacterium; J-3FECA28; DQ340878

S000653871-not_calculated-0.957-0491-*Brevundimonas* sp. J3-AN30; DQ454120

S000731734-not_calculated-0.966-1127-uncultured bacterium; JSC2-F4; DQ532179

S000995616-not_calculated-0.968-0402-*Brevundimonas* sp. C5; EU368189

S001098243-not_calculated-0.967-0547-*Brevundimonas diminuta*; XJTUMS24; EU603704

S001418590-not_calculated-0.950-0515-*Brevundimonas diminuta*; 384-1; FN298269

S002234041-not_calculated-0.962-0499-*Alphaproteobacterium* 3_68p; HQ154641

S002912835-not_calculated-0.954-0783-*Brevundimonas olei*; HKG 139; JF790199

S002988234-not_calculated-0.948-0862-*Brevundimonas diminuta*; IPSr105; HM134009

S003286831-not_calculated-0.936-0936-*Br. naejangsensis*; VT1; AB731591

S004220630-not_calculated-0.951-0889-*Brevundimonas* sp. MRL-AN1; KJ742424

S004355116-not_calculated-0.942-0516-un. bacterium; I1960TT01DWMD1; KM305621

S004358487-not_calculated-0.948-0515-un. bacterium; I1960TT01BJMPZ; KM309001

S004365761-not_calculated-0.971-0515-un. bacterium; I1960TT01DGSXQ; KM316303

S004409257-not_calculated-0.948-0985-uncultured bacterium; 11; KP003914

S004455279-not_calculated-0.948-1044-*Br. subvibrioides*; HBA2; KP402409

S004495251-not_calculated-0.947-0646-*Brevundimonas diminuta*; WEA123; KT277492

S004538274-not_calculated-0.990-0587-*Brevundimonas* sp. ST12.14/118; KP405866

На основании полученных результатов для исследуемого штамма ПКИ-12Л можно выделить несколько важных моментов:

1. В выборке представлены как культивируемые виды *Brevundimonas*, так и несколько некультивируемых бактерий, что подчеркивает биоразнообразие и потенциальные взаимодействия между различными таксонами. Примером являются некультивируемые штаммы с высоким уровнем сходства (от 0.936 до 0.990), что может свидетельствовать о близком родстве и схожих условиях обитания.
2. Высокое сходство последовательностей (от 0.936 до 0.990) среди штаммов *Brevundimonas* такие, как: *Brevundimonas diminuta* (например, идентификаторы S001098243, S001418590, S002988234, S004495251) с достаточно высокими индексами сходства, что может указывать на их экологическую роль и возможное схожее поведение в естественной среде. А также высокое сходство между некультивируемыми штаммами (например, S000543524, S000640172, S000731734). Это позволяет предположить, что бактерии могут играть важную роль в экосистемах, в которых они обитают, несмотря на отсутствие культуры в лабораторных условиях.
3. Изученные таксономические группы, в частности подвиды *Brevundimonas* имеют схожие метаболические пути и могут быть адаптированы под специфические экологические ниши. Указание на *Alphaproteobacterium* (S002234041) также вызывает интерес, так как эти бактерии известны своим разнообразием и роли в различных микробных экосистемах.
4. Изучение экологической роли некультивируемых бактерий, которые могут обладать уникальными

свойствами и указывать на ключевые функции в экосистемах, включая биоремедиацию или взаимодействие с другими микроорганизмами.

Полученные результаты свидетельствуют о значительном потенциале для исследования как культивируемых, так и некультивируемых штаммов *Brevundimonas* и их взаимодействия в экосистемах. Понимание этих аспектов будет важным для биологических, экологических и биотехнологических исследований.

2. Штамм СТ_555восемь_Δ4_3200-3_1492R_Двосемь.seg.

Филогенетический анализ родственных связей, проведённый на основе типовых штаммов близкородственных бактерий с учётом их физиологических характеристик, выявил, что наибольшую таксономическую близость к исследуемому штамму СТ демонстрирует вид, относящийся к домену Bacteria, филуму Proteobacteria, классу Gammaproteobacteria, порядку Pseudomonadales, семейству Pseudomonadaceae и роду *Pseudomonas*.

Результаты анализа секвенсов, выполненного с использованием компьютерной программы, доступной на платформе RDB II (Ribosomal Database Project II), которая предназначена для исследования родословных связей микроорганизмов и построения филогенетических деревьев, представлена в графическом формате:

S000094771-not_calculated-0.769-0398-*Pseudomonas* sp. EJP 115; AJ344222

S000139069-not_calculated-0.760-0454-uncultured *Pseudomonas* sp.; 103; AJ578066

S000333796-not_calculated-0.767-0417-uncultured bacterium; S1-113RD4; AY645043

S000361784-not_calculated-0.770-0399-*Pseudomonas* sp. A330; AY581679

S000648640-not_calculated-0.763-0489-*Pseudomonas* sp. J3-N6; DQ363425

S000749275-not_calculated-0.769-0394-uncultured bacterium; Ms-R510; EF094297

S000749866-not_calculated-0.763-0477-*Pseudomonas alcaligenes*; E0-I24; AM262105

S000775978-not_calculated-0.757-0437-*Pseudomonas* sp. EGU448; DQ768241

S000892578-not_calculated-0.757-0437-*Pseudomonas* sp. EGU448; EF633182

S001591797-not_calculated-0.757-0469-uncultured bacterium; CL42DTW4; FJ204970

S001591861-not_calculated-0.766-0432-uncultured bacterium; CL27STW5; FJ205034

S001591872-not_calculated-0.796-0431-uncultured bacterium; CL38STW5; FJ205045

S001591889-not_calculated-0.820-0411-uncultured bacterium; CL55STW5; FJ205062

S001591892-not_calculated-0.782-0432-uncultured bacterium; CL58STW5; FJ205065

S002227010-not_calculated-0.773-0683-bacterium F42CA; HM204985

S002227011-not_calculated-0.765-0599-bacterium F42CH; HM204986

S002236190-not_calculated-0.757-0703-*Pseudomonas aeruginosa*; HUC; AB576190

S003755629-not_calculated-0.761-0682-*Pseudomonas aeruginosa*; 34SS; KC433742

Анализ полученных последовательностей генов, включающих как культивируемые, так и некультивируемые штаммы, продемонстрировал разнообразие и богатство филогенетического родства внутри группы *Pseudomonas*. Из представленных данных также можно выделить несколько ключевых моментов:

1. В выборке обнаружены как хорошо изученные виды, такие как *Pseudomonas aeruginosa* и *Pseudomonas alcaligenes*, так и некультивируемые штаммы, что свидетельствует о биоразнообразии бактерий в изучаемой среде.
2. Анализ значений сходства показывает, что некультивируемые штаммы, такие как «uncultured bacterium» с идентификаторами, начиная от Ms-R510 до CL55STW5, имеют различные индексы сходства (от 0.757 до 0.820). Это может указывать на их потенциальное родство с известными видами *Pseudomonas* или другими близкими таксонами.
3. Наличие нескольких некультивируемых штаммов подчеркивает важность дальнейшего изучения их свойств и экологии, поскольку они могут обладать уникальными метаболическими путями или адаптациями, которые еще не были исследованы.
4. Высокая степень сходства между штаммами может также свидетельствовать о высоком уровне их адаптации к специфическим условиям окружающей среды, что имеет значение для понимания их экологии и биологических функций.

В ходе биохимического тестирования выявлены некоторые комплексные черты, которые отражают метаболическое и функциональное поведение доминантных культур.

3. Бактерии рода *Bacillus*

Род *Bacillus* включает множество разнообразных видов бактерий, которые имеют некоторые общие характеристики, например:

Bacillus обычно представляют собой грамположительные, палочковидные организмы. Они имеют жесткую клеточную стенку, которая придает им форму палочки. Некоторые виды могут образовывать эндоспоры, специальные структуры, которые позволяют им выживать в экстремальных условиях.

Большинство видов *Bacillus* являются аэробами и могут использовать различные источники питания, такие как: глюкоза, лактоза, сахароза и другие органические соединения. Оптимальная температура роста +30...+37 °С. Некоторые виды могут функционировать при +4 и +8 °С.

Бактерии рода *Bacillus* также проявляют активность в продукции ферментов, таких как амилазы, протеазы и липазы, которые позволяют им эффективно разлагать полимеры (например, крахмал, белки и жиры) и использовать их в качестве источников углерода и энергии.

Все бактерии рода *Bacillus* обладают активностью каталазы. Каталаза является ферментом, который катализирует разложение перекиси водорода (H_2O_2) до воды (H_2O) и кислорода (O_2). Перекись водорода может быть токсичной для клеток бактерий, поэтому наличие активной каталазы способствует обезвреживанию этого соединения и поддержанию внутриклеточного равновесия.

4. Плесневые грибы рода *Aspergillus*

Общие свойства, характерные для плесневых грибов р. *Aspergillus*:

1. *Aspergillus* имеют характерную морфологию, которая включает в себя веерообразные или головчатые структуры, называемые конидиофоры. Конидиофоры представляют собой разветвленные нити, на которых образуются споры — конидии.
2. Конидии *Aspergillus* часто имеют овальную форму и гладкую поверхность. Они обладают высокой репродуктивной способностью и способны быстро распространяться и колонизировать ОС. Конидии *Aspergillus* могут быть различной окраски, включая белую, зеленую или черную.
3. *Aspergillus* широко распространены как внутри помещений, так и в ОС. Они могут быть найдены в почве, на растениях, в пыли, на пищевых продуктах и в других природных и искусственных средах. Некоторые виды *Aspergillus* также могут вызывать инфекции у людей и животных.
4. *Aspergillus* обладают разнообразными метаболическими способностями. Они способны разлагать и использовать различные органические соединения как источник питания.

Вывод

Исследование, проведенное с 2018 по 2024 годы, выявило общие закономерности в распространении микроорганизмов на поверхностях ПКМ в условиях открытой экосистемы. Сравнительный анализ показал, что микробный состав поверхностей ПКМ имеет определенные аналогии с микробными сообществами, собранными из атмосферы и почвы, что подтверждает роль микроорганизмов в поддержании биологического разнообразия экосистемы и влияния на структурную целостность материалов, что согласуется с результатами других исследователей, занимающихся изучением механизмов биодеградации и механизмов образования биопленок на полимерных композитах [8, С. 68–79; 9, с. 5–14; 10, 6–22].

ЛИТЕРАТУРА

1. Метод экспресс-определения организмов-биодеструкторов полимерных композиционных материалов в природных средах / А.Б. Лаптев, Т.П. Турова, Д.Ш. Соколова [и др.] // Полимерные композиционные материалы нового поколения и технологии их переработки: материалы Всероссийской научно-технической конференции, Москва, 21 августа 2020 года / Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов. — Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, 2020. — С. 172–185.
2. Открытые вопросы в области биоразложения биокомпозиционных материалов / П.В. Пантюхов, Е.Е. Масталыгина, З.Р. Абушахманова [и др.] // Плехановский научный бюллетень. — 2023. — № 2(24). — С. 56–61.
3. Полякова Е.А. Исследование процессов биодеструкции и экотоксикологической безопасности полимерного композиционного материала / Е.А. Полякова, И.С. Коротнева, Б.С. Туров // Научно-технический вестник Поволжья. — 2014. — № 3. — С. 50–53.
4. Ермишев В.Ю. Особенности оценки стойкости полимерных материалов к биодеструкции в лабораторных условиях*часть 2. Образцы и методы их анализа / В.Ю. Ермишев, А.Б. Лаптев, В.О. Старцев // Труды ВИАМ. — 2023. — № 8(126). — С. 138–148. — DOI 10.18577/2307–6046-2023-0-8-138-148.

5. Выделение предполагаемых биодеструкторов полимерных материалов из почвенных сред / А.В. Бушева, Г.Р. Хажиева, Е.Д. Мурзина, С.В. Шулаев // Успехи в химии и химической технологии. — 2022. — Т. 36, № 12(261). — С. 158–160.
6. Первичная санитарно-гигиеническая оценка микроорганизмов, применяемых в биотехнологиях / В.В. Королик, Н.И. Шеина, Л.И. Мясина [и др.] // Гигиена и санитария. — 2023. — Т. 102, № 2. — С. 135–140. — DOI 10.47470/0016-9900-2023-102-2-135-140.
7. Определитель бактерий Берджи [Текст]: в 2-х томах / [Р. Беркли и др.]; под ред. Дж. Хоулта [и др.]; пер. с англ. под ред. акад. РАН Г.А. Заварзина. — 9-е изд. — М.: Мир, 1997. — Т. 1. — 429 с.
8. Усачева М.Н. Биодegradация армированных полимерных композиционных материалов (обзор) / М.Н. Усачева, А.В. Хрульков // Труды ВИАМ. — 2022. — № 6(112). — С. 68–79. — DOI 10.18577/2307-6046-2022-0-6-68-79.
9. Лаптев А.Б. Общий механизм биологического разрушения полимерных материалов (обзор) / А.Б. Лаптев, А.А. Кривушина // Коррозия: защита, материалы. Приложение к журналу «Технология металлов». — 2023. — № 16. — С. 5–14. — DOI 10.31044/1684-2499-2023-0-16-5-14.
10. Воробьева Е.В. Биоразлагаемые композиты на основе ископаемых видов сырья. Часть II: Процесс биодegradации / Е.В. Воробьева, А.А. Попов // Полимерные материалы и технологии. — 2023. — Т. 9, № 1. — С. 6–22. — DOI 10.32864/polymmattech-2023-9-1-6-22.

© Ерофеевская Лариса Анатольевна (lora-07.65@mail.ru); Кычкин Анатолий Константинович (kychkinplasma@mail.ru);
Салтыкова Анастасия Леонидовна (ny97@mail.ru); Вит Алина Александровна (alina_vit@list.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

РЕМЕДИАЦИОННОЕ ВЛИЯНИЕ РАЙГРАСА НА ОРГАНИЧЕСКОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ

Чжу Куньхао

доктор философии,

Белорусский государственный университет

1903199554@qq.com

REMEDICATION EFFECT OF RYEGRASS ON ORGANIC POLLUTION OF MINING AREAS

Zhu Kunhao

Summary. This study aims to evaluate the ability of ryegrass to remediate contaminated soils in a mining area of Belarus and its potential for pollutant monitoring. The study includes field experiments to test the effectiveness of ryegrass in removing heavy metals and organic pollutants. It is assumed that ryegrass not only restores the soil but also accumulates pollutants, which allows for long-term environmental monitoring. The methods include pollutant analysis, measuring changes in pollutant concentrations in the soil and their accumulation in plants. The results showed that ryegrass significantly reduces the concentration of heavy metals and organic pollutants, confirming its effectiveness in environmental remediation and monitoring. This provides a cost-effective solution for environmental management in mining areas.

Keywords: ryegrass, mining site remediation, pollution monitoring, Belarus, heavy metals.

Аннотация. Данное исследование направлено на оценку способности райграса к ремедиации загрязнённых почв в горнодобывающем районе Беларуси и его потенциала для мониторинга загрязнителей. Исследование включает проведение полевых экспериментов для проверки эффективности райграса в удалении тяжёлых металлов и органических загрязнителей. Предполагается, что райграс не только восстанавливает почву, но и накапливает загрязнители, что позволяет осуществлять долгосрочный экологический мониторинг. Методы включают анализ загрязнителей, измерение изменений концентрации загрязняющих веществ в почве и их накопления в растениях. Результаты показали, что райграс значительно снижает концентрацию тяжёлых металлов и органических загрязнителей, подтверждая его эффективность в экологической ремедиации и мониторинге. Это обеспечивает экономически эффективное решение для управления окружающей средой в горнодобывающих районах.

Ключевые слова: райграс, ремедиация горнодобывающих участков, мониторинг загрязнений, Беларусь, тяжелые металлы.

Введение

С ускорением глобальной индустриализации значительно увеличилась разработка и использование минеральных ресурсов, что привело к усилению загрязнения окружающей среды в горнодобывающих районах. Загрязнённые почвы в этих регионах часто богаты тяжёлыми металлами [1]. Эти загрязняющие вещества представляют серьёзную угрозу для экологии почвы и здоровья человека. Беларусь, как важная страна-минералопроизводитель в Восточной Европе, имеет несколько горнодобывающих районов, которые на протяжении долгого времени страдают от загрязнений и требуют срочных эффективных мер по их восстановлению и управлению.

Хотя традиционные физико-химические методы ремедиации могут быстро снизить концентрацию загрязнителей в почве, они дорогостоящие и могут вызвать вторичное загрязнение. В отличие от них, биоремедиационные технологии привлекли широкое внимание благодаря своей низкой стоимости, простоте в эксплуатации и экологической безопасности [2]. Фиторемедиа-

ция, как важная форма биоремедиации, использует способность растений поглощать, накапливать и разлагать загрязняющие вещества. Она постепенно становится эффективным методом для восстановления загрязнённых почв в горнодобывающих районах [3].

Между тем, данное исследование направлено на оценку эффективности ремедиации загрязнённых почв на горнодобывающих территориях Беларуси с помощью райграса и экспериментальную проверку его пригодности в качестве инструмента биологического мониторинга.

Исследовательский фон

Горнодобывающие районы Беларуси долгое время являлись важной частью экономического развития страны. Однако экологические проблемы, вызванные горнодобывающей деятельностью, становятся все более очевидными. В нескольких горнодобывающих регионах Беларуси, особенно в южных и восточных частях, накопление горных отходов и хвостов привело к резкому увеличению концентрации тяжёлых металлов и орга-

нических загрязнителей в почве.[5]Эти загрязнители не только влияют на местные сельскохозяйственные угодья и источники воды, но и представляют угрозу для экосистем окружающих сообществ и общественного здоровья.

В последние годы правительство Беларуси и экологические организации активно исследуют различные методы ремедиации почв. Хотя физические и химические методы дают быстрые результаты, они сложны в эксплуатации и дорогостоящи, что затрудняет их широкомасштабное применение. В отличие от них, методы биоремедиации благодаря своей низкой стоимости и экологичности постепенно становятся предпочтительным выбором для борьбы с загрязнением на горнодобывающих территориях. Среди этих методов важным подходом биоремедиации является фиторемедиация, которая использует естественный рост и абсорбционные способности растений для удаления, переноса или стабилизации загрязнителей в почве. Это доказало свою эффективность и экономичность в качестве метода ремедиации [6]. Поскольку фиторемедиация может улучшать качество почвы, не нарушая экосистему, и ее эксплуатация не требует энергоемкого или сильно загрязняющего оборудования, она особенно хорошо подходит для использования на крупных загрязненных территориях [7]. Недавние исследования показали, что кормовые растения, такие как райграс (*Lolium perenne*), благодаря своей высокой устойчивости, хорошо развитой корневой системе и способности поглощать и накапливать загрязняющие вещества, такие как тяжелые металлы, демонстрируют отличные результаты ремедиации в различных почвенных условиях.

Экспериментальная площадка

Эксперимент проводился в сильно загрязненной горнодобывающей зоне Солигорска на юге Беларуси. Этот район в основном специализируется на добыче металлических полезных ископаемых, и длительное накопление горных отходов и хвостов привело к значительному превышению концентраций тяжелых металлов в окружающей почве. Согласно предварительным исследованиям, начальные концентрации тяжелых металлов в почве были следующими: свинец (Pb) — 250 мг/кг, кадмий (Cd) — 15 мг/кг, медь (Cu) — 100 мг/кг, а общая концентрация полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) составила 50 мг/кг, что значительно превышает национальные нормы безопасности [8].

Экспериментальная площадка была выбрана в пределах загрязненной зоны площадью 200 квадратных метров в горнодобывающем районе. Участок был ровным, без значительной растительности, что соответствовало условиям, необходимым для проведения эксперимента. Перед началом эксперимента были проведены отбор

проб и анализ почвы для подтверждения начальных концентраций загрязняющих веществ.

Экспериментальные материалы и методы

1. Экспериментальные материалы

- Семена райграса: Предоставлены Белорусским сельскохозяйственным научно-исследовательским институтом. Для эксперимента были отобраны, проверены и стерилизованы здоровые семена.
- Экспериментальная почва: Пробы почвы были собраны на экспериментальной площадке. Предварительный анализ подтвердил, что концентрации тяжелых металлов и органических загрязнителей в почве превышают допустимые нормы.
- Инструменты и оборудование: для обнаружения тяжелых металлов использовалась атомно-абсорбционная спектроскопия (AAS), а для обнаружения органических загрязнителей использовалась газовая хроматография с масс-спектрометрией (GC-MS).

2. Экспериментальный дизайн

Эксперимент был выполнен по методу случайного блочного дизайна с двумя группами:

- Контрольная группа: Загрязненная почва без посадки райграса.
- Экспериментальная группа: Загрязненная почва с посадкой райграса.

Для каждой группы было создано три повторности. Райграс был посажен с плотностью 20 граммов семян на квадратный метр, а продолжительность эксперимента составила 90 дней. Пробы почвы и растений отбирались каждые 30 дней. После каждого отбора проводился анализ концентраций тяжелых металлов и органических загрязнителей в почве, а также анализ растительных образцов на содержание тяжелых металлов.

3. Анализ образцов почвы и растений

- Анализ почвы: Образцы почвы были высушены на воздухе и просеяны перед анализом. Концентрации свинца, кадмия и меди определялись с помощью атомно-абсорбционной спектроскопии (AAS). Содержание полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) анализировалось с использованием газовой хроматографии с масс-спектрометрией (GC-MS).
- Анализ растений: после сбора надземной части райграса образцы были обработаны и высушены. Затем содержание тяжелых металлов в растительных тканях измерялось с использованием AAS.

4. Анализ данных

В данном эксперименте все данные были подвергнуты статистическому анализу с использованием

программного обеспечения SPSS, при этом основное внимание уделялось применению однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) для оценки различий между экспериментальной и контрольной группами. Этот подход помогает оценить значимость изменений, наблюдаемых в концентрациях загрязнителей [9]. Дисперсионный анализ (ANOVA) является распространенным статистическим методом, который эффективно проверяет, существуют ли значительные различия между средними значениями двух или более групп. В данном исследовании основная цель использования однофакторного дисперсионного анализа заключается в сравнении изменений концентраций тяжелых металлов (свинца, кадмия, меди) и органических загрязнителей при различных экспериментальных условиях, особенно в сравнении концентраций между экспериментальной группой (с посадкой райграса) и контрольной группой (без посадки райграса).

Благодаря этому строгому статистическому анализу экспериментальные выводы были дополнительно научно подтверждены, что доказало значительный потенциал райграса в ремедиации загрязненных почв [10]. Предыдущие исследования показали, что аналогичные методы фиторемедиации оказывают заметное влияние на восстановление почв, загрязненных тяжелыми металлами, что предоставляет серьезную теоретическую поддержку результатам данного исследования.

Результаты и обсуждение

1. Влияние райграса на ремедиацию загрязнения тяжелыми металлами

В течение 90-дневного экспериментального периода концентрации свинца, кадмия и меди в почве экспериментальной группы значительно снизились

Таблица 1.

Изменение концентраций тяжелых металлов в почве в течение 90-дневного периода ремедиации

	Heavy Metal	Initial Concentration	Final Concentration	Reduction Rate (%)
1	Lead (Pb)	250	170	32
2	Cadmium (Cd)	15	10	33
3	Copper (Cu)	100	75	25

По сравнению с контрольной группой, в экспериментальной группе было зафиксировано значительное снижение содержания тяжелых металлов, что указывает на то, что райграсс эффективно поглощает и стабилизирует тяжелые металлы в почве. Это свидетельствует о том, что райграсс, благодаря своей хорошо развитой корневой системе и высокой адаптивности, активно поглощает тяжелые металлы, такие как свинец, кадмий и медь,

из почвы и накапливает их в своих тканях. По мере роста растений тяжелые металлы либо фиксируются в зоне корней, либо перемещаются в надземные части растения, что приводит к снижению общей концентрации этих загрязнителей в почве. Этот процесс не только уменьшает подвижность и биодоступность тяжелых металлов, но и способствует предотвращению их дальнейшего распространения в соседние экосистемы, такие как водоемы и сельскохозяйственные угодья.

Значительная разница, наблюдаемая между контрольной и экспериментальной группами, дополнительно подтверждает гипотезу о том, что райграсс может служить практичным и эффективным средством фиторемедиации для почв, загрязненных тяжелыми металлами. Результаты соответствуют выводам других исследований по фиторемедиации, подтверждая, что такие растения, как райграсс, особенно подходят для крупномасштабной экологической ремедиации благодаря своей экономичности и устойчивости.

2. Влияние райграса на удаление органических загрязнителей

Результаты эксперимента показали, что райграсс значительно снижает концентрацию органических загрязнителей, особенно полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), в загрязненной почве. В течение 90-дневного периода концентрация ПАУ снизилась с первоначальных 50 мг/кг до 38 мг/кг, что соответствует снижению на 24 %. Эти результаты свидетельствуют о том, что райграсс не только способствует ремедиации тяжелых металлов, но и активно улучшает процесс деградации органических загрязнителей.

Удаление ПАУ с помощью райграса в первую очередь связано с увеличением микробной активности в ризосфере — зоне вокруг корней растений. Корни райграса выделяют органические соединения, известные как корневые экссудаты, которые служат источником питательных веществ для почвенных микроорганизмов. Эти микроорганизмы, включая бактерии и грибы, играют ключевую роль в разложении сложных органических загрязнителей, таких как ПАУ, на менее токсичные соединения. Повышенная микробная активность в ризосфере ускоряет естественный процесс биodeградации ПАУ, что приводит к более эффективному снижению этих загрязнителей в почве.

Кроме того, райграсс улучшает аэрацию почвы, создавая более благоприятные условия для аэробных микроорганизмов, которые играют ключевую роль в деградации ПАУ. Способность растения поддерживать разнообразное микробное сообщество в почве является важным фактором, способствующим ускоренному разложению органических загрязнителей. Эта симбиотиче-

ская связь между райграсом и почвенными микроорганизмами подчеркивает способность растения не только накапливать загрязняющие вещества, но и способствовать их разложению с помощью естественных биологических процессов. В целом, снижение концентрации ПАУ, наблюдаемое в данном исследовании, подчеркивает эффективность райграса как инструмента биоремедиации органических загрязнителей. Стимулируя микробную деградацию, райграс предлагает устойчивый и экологически чистый подход к снижению органического загрязнения в загрязненных почвах, что расширяет его роль в усилиях по экологической ремедиации.

Заключение

1. Эффективность ремедиации

Райграс показал значительную эффективность в снижении концентраций как тяжелых металлов, так и органических загрязнителей в загрязненной почве в течение 90-дневного экспериментального периода. В частности, концентрация свинца (Pb) снизилась на 32 %, кадмия (Cd) — на 33 %, меди (Cu) — на 25 %, а полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) — на 24 %. Эти снижения были не только значительными, но и статистически подтвержденными ($p < 0.05$), что подчеркивает сильный потенциал райграса как эффективного средства фиторемедиации для загрязненных почв, особенно в районах, где добывающая деятельность является источником загрязнения.

Способность райграса поглощать и стабилизировать эти загрязняющие вещества играет ключевую роль в улучшении качества почвы. Хорошо развитая корневая система растения позволяет ему извлекать тяжелые металлы из почвы и накапливать их в своих тканях, тем самым снижая концентрацию вредных веществ в окружающей среде. Кроме того, райграс способствует деградации органических загрязнителей, таких как ПАУ, стимулируя микробную активность в ризосфере. Поддерживая здоровую микробную экосистему, райграс усиливает естественные процессы биодеградации, что дополнительно поддерживает его эффективность в ремедиации сильно загрязненных почв.

Результаты этого исследования показывают, что райграс предлагает устойчивое, экономически эффективное и экологически чистое решение для снижения загрязнения почвы, что делает его ценным инструментом для крупных проектов по ремедиации, особенно в регионах, пострадавших от добывающей деятельности. Его двойная способность устранять как загрязнение тяжелыми металлами, так и органическими веществами подчеркивает его универсальность и широкий потенциал применения в области восстановления окружающей среды.

2. Потенциал биологического мониторинга

Райграс также продемонстрировал значительный потенциал в качестве эффективного инструмента биологического мониторинга, накапливая значительные количества тяжелых металлов в своих тканях. В частности, свинец и кадмий накапливались в райграсе в концентрациях 20 мг/кг и 5 мг/кг соответственно. Эта способность поглощать и удерживать тяжелые металлы в своей биомассе позволяет райграсу выступать в роли живого индикатора уровней загрязнения почвы. Накопление этих металлов в растении было тесно связано с уменьшением их концентраций в почве, что подтверждается высокими коэффициентами корреляции: 0,89 для свинца и 0,91 для кадмия. Эти сильные корреляции указывают на то, что райграс может не только способствовать ремедиации, но и служить надежным и точным методом отслеживания загрязнения почвы с течением времени.

Потенциал райграса как инструмента биологического мониторинга особенно ценен в контексте долгосрочного управления окружающей средой. Регулярный анализ содержания тяжелых металлов в тканях растения позволяет получить представление о динамике загрязнения почвы и оценить эффективность усилий по ремедиации. Этот подход является экономически эффективным, поскольку устраняет необходимость в дорогостоящих и сложных процедурах отбора и анализа почвы, при этом предоставляя точные и полезные данные об уровнях загрязнения. Кроме того, использование райграса в качестве биологического индикатора является экологически безопасным, поскольку не требует использования вредных химических веществ или инвазивных методов тестирования, что делает его устойчивым решением для постоянного мониторинга почвы.

В целом, результаты этого исследования подчеркивают двойную функциональность райграса как агента ремедиации и инструмента биологического мониторинга. Его способность отражать изменения в уровнях загрязнения почвы в режиме реального времени обеспечивает практичный и доступный способ контроля загрязнения на больших территориях, таких как горнодобывающие регионы. Это делает райграс ценным активом не только для очистки загрязненных почв, но и для долгосрочного наблюдения и управления состоянием окружающей среды.

3. Комплексное экологическое решение

Райграс предлагает устойчивое и экономически эффективное решение для долгосрочного управления почвами, загрязненными вследствие горнодобывающей деятельности. Его способность эффективно удалять как тяжелые металлы, так и органические загрязнители делает его универсальным инструментом, способ-

ным справляться с различными видами загрязнений. Двойная функция райграса — как агента ремедиации и инструмента биологического мониторинга — обеспечивает двойное преимущество, позволяя одновременно очищать загрязнители и проводить непрерывный контроль за уровнем загрязнения. Такое объединение ремедиации и мониторинга упрощает процесс экологического управления, предлагая более эффективный и непрерывный подход к восстановлению здоровья почв в затронутых районах.

Результаты данного исследования подтверждают, что райграс имеет широкий потенциал в качестве практического инструмента как для ремедиации, так и для мониторинга в горнодобывающих регионах. Его экономическая эффективность и экологическая безопасность делают его особенно подходящим для применения в крупных масштабах на сильно загрязненных территориях. Использование райграса также снижает необходимость в дорогостоящих и ресурсоемких технологиях, которые

обычно связаны с традиционными методами ремедиации, что делает его доступным для долгосрочного экологического управления. Путем предоставления данных в реальном времени об уровне загрязнения с помощью биологического мониторинга райграс предлагает динамичный подход к восстановлению окружающей среды, способный адаптироваться к изменяющимся условиям загрязнения.

В заключение райграс представляет собой практичное и масштабируемое решение для восстановления загрязненных горнодобывающих почв, сочетая эффективное удаление загрязнителей с возможностями непрерывного мониторинга. Его применение может значительно способствовать восстановлению деградированных экосистем, предлагая устойчивый и экономически эффективный метод защиты окружающей среды и обеспечения безопасности прилегающих сообществ от вредного воздействия загрязнения почвы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Photodegradation of organic pollutants using heterojunctions: A review/ K. Kaur, et al.// *Journal of Environmental Chemical Engineering*. — 2020.— Vol. 8.— P. 103666.
2. Soil bioremediation: Overview of technologies and trends/ I. G. Sales da Silva, et al.// *Energies*. — 2020.— Vol. 13.— P. 4664.
3. Enhancement of electrokinetic-bioremediation by ryegrass: sustainability of electrokinetic effect and improvement of n-hexadecane degradation/ Y. Wu, et al.// *Environmental research*. — 2020.— Vol. 188.— P. 109717.
4. Approaches to Ecosystem Services and Biodiversity Assessment in Belarus/ S. Zenchanka and N. Gorbachev. // *Handbook of Climate Change and Biodiversity*. — 2019.— Vol. P. 61–78.
5. Overview of bioremediation with technology assessment and emphasis on fungal bioremediation of oil contaminated soils/ C.M. Quintella, et al.// *Journal of environmental management*. — 2019.— Vol. 241.— P. 156–166.
6. Phytoremediation: a sustainable environmental technology for heavy metals decontamination/ B. Nedjimi. // *SN Applied Sciences*. — 2021.— Vol. 3.— P. 286.
7. Phytoremediation technologies and their mechanism for removal of heavy metal from contaminated soil: An approach for a sustainable environment/ J. K. Sharma, et al. // *Frontiers in Plant Science*. — 2023.— Vol. 14.— P. 1076876.
8. Spatiotemporal changes of soil salinization in the Soligorsk mining region/ A. Chervan, et al.// *Eurasian Soil Science*. — 2019.— Vol. 52.— P. 998–1006.
9. Enhancement of electrokinetic-bioremediation by ryegrass: sustainability of electrokinetic effect and improvement of n-hexadecane degradation/ Y. Wu, et al.// *Environmental research*. — 2020.— Vol. 188.— P. 109717.
10. Research Progress and Hotspots in Microbial Remediation for Polluted Soils/ S. Zhao, et al.// *Sustainability*. — 2024.— Vol. 16.— P. 7458.

© Чжу Куньхао (1903199554@qq.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

МОЛЕКУЛЯРНО-ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕСТОВАCTЕРИUM BRASILIENSE, ВЫДЕЛЕННОГО ИЗ ОБРАЗЦОВ РАСТЕНИЙ В БЕЛАРУСИ

Шао Чэньюе

Аспирант, Белорусский государственный университет
520095424@qq.com

Евтушенко Анатолий Николаевич

Доктор биологических наук, профессор,
Белорусский государственный университет
Evtushenkov@bsu.by

MOLECULAR GENETIC ANALYSIS OF PECTOBACTERIUM BRASILIENSE ISOLATED FROM PLANT SAMPLES IN BELARUS

Shao Chengyue
A. Yevtushenkov

Summary. Potato samples with blackleg disease were collected in the Belarus region, and bacteria were extracted. Biochemical and molecular genetic analyses revealed that the characteristics of seven bacterial strains were consistent with those of *Pectobacterium brasiliense*. Bacterial genomes were extracted and amplified using *Pectobacterium brasiliense*-specific primers BR1f and L1r. One sample was selected for gene extraction and whole genome sequencing, and its genome showed similarity to *Pectobacterium brasiliense*. Pathogen identification was confirmed by phylogenetic analysis using 16S RNA genes. After plant inoculation, the same symptoms were observed on potato stems, potato tubers and carrot tubers, satisfying Koch's hypothesis. *Pectobacterium brasiliense* infection has been reported in Brazil, the USA, Russia, and China.

Keywords: potato, blackleg disease, potato soft rot, *Pectobacterium brasiliense*.

Аннотация. В Белорусской области были собраны образцы картофеля, пораженного черной ножкой, и выделены бактерии. Биохимический и молекулярно-генетический анализы показали, что характеристики семи штаммов бактерий соответствуют характеристикам *Pectobacterium brasiliense*. Бактериальные геномы были выделены и амплифицированы с использованием праймеров R1 и L1r, специфичных для *Pectobacterium brasiliense*. Для выделения генов и секвенирования всего генома был отобран один образец, и его геном показал сходство с *Pectobacterium brasiliense*. Идентификация патогена была подтверждена филогенетическим анализом с использованием генов 16S РРНК. После инокуляции растений те же симптомы наблюдались на стеблях, клубнях картофеля и моркови, что подтверждает гипотезу Коха. Заражение *Pectobacterium brasiliense* было зарегистрировано в Бразилии, США, России и Китае.

Ключевые слова: картофель, черная ножка, мягкая гниль картофеля, *Pectobacterium brasiliense*.

Введение

Бактериальная мягкая гниль растений является одной из наиболее острых проблем в мире. Большинство возбудителей, вызывающих так называемое «скрытое загрязнение», относятся к семейству Soft-rot Enterobacteriaceae (SRE), среди которых ключевыми родами являются *Pectobacterium* и *Dickeya* [19, с. 426]. Эти два рода включают многочисленные фитопатогенные бактерии, зарегистрированные в различных странах по всему миру. Они способны вызывать серьёзную мягкую гниль у растений-хозяев. Спектр растений-хозяев весьма широк, включая культурные растения, фрукты, овощи, декоративные растения и т.д. Основные симптомы заболевания включают гниение, увядание, почернение стебля и другие проявления, что приводит к значительному ущербу для сельского хозяйства [18, с. 20].

Pectobacterium brasiliense впервые был классифицирован в 2004 году Дуарте и соавторами как новый подвид *Pectobacterium carotovora*, вызывающий черную ножку и мягкую гниль картофеля [4, с. 536]. Хотя *P. brasiliense* был

обнаружен относительно недавно, за последние годы он был выявлен на различных растениях-хозяевах в разных странах, где вызвал значительный ущерб сельскохозяйственному производству, став важным патогеном, который нельзя игнорировать. Бактерии вызывают склеивание листьев, стеблей и клубней картофеля. В тяжёлых случаях наблюдаются перфорация листьев, гниение плодов и увядание растений, что приводит к значительному снижению урожайности картофеля или даже к полному уничтожению урожая [4, с. 540; 12, с. 9]. Возбудитель был зарегистрирован в Бразилии, Канаде, США, Южной Африке, Новой Зеландии и других странах [5, с. 2042; 7; 17, с. 235; 6, с. 684; 10, с. 177; 10, с. 180]. В июне 2020 года в Беларуси были собраны образцы растений картофеля с симптомами черной ножки, а проведённые биохимические и генетические тесты патогенных бактерий подтвердили их принадлежность к *Pectobacterium brasiliense*.

Данная работа посвящена изучению физиологии и биохимии растений, поражённых *Pectobacterium brasiliense* в Беларуси, где наблюдаются симптомы бактериальной инфекции в тканях растений.

Материалы и методы

Бактерии *P. brasiliense* были выделены из образцов поражённых растений и культивированы на картофельном агаре. Штаммы с патогенностью к растениям, способностью разрушать пектины, целлюлолитической активностью и патогенностью при инокуляции клубней картофеля были отобраны из общего числа выделений для дальнейшего изучения.

В соответствии со стандартными протоколами идентификации бактерий были проведены физиологические и биохимические тесты (тест на активность лецитиназы, дегидрогеназная активность, использование органических кислот, образование углеводов в кислотной среде при 28°C, рост при 37°C, образование сахарозы, восстановление сахара и т.д.) на отобранных штаммах [4, с. 537].

Геномы бактерий были выделены и амплифицированы с использованием специфичных праймеров для *P. brasiliense*: BR1f (5'-gcgtgccgggttatgacct-3') и L1r (5'-carggcatccaccgt-3') [4, с. 538]. Затем геномы штаммов были секвенированы, и нуклеотидные последовательности определены с помощью секвенатора Illumina MiSeq. Сборка генома была выполнена с использованием онлайн-программы Proksee. Использовалось программное обеспечение Prodigal для предсказания кодирующих последовательностей белков (CDS) и функциональной аннотации генов [13].

Для филогенетического анализа была получена последовательность гена 16S рНК целевых бактерий с фрагментом размером 1437 пар оснований. На основе опубликованных в генбанке последовательностей гена 16S рНК 5 штаммов *Pectobacterium*: *P. brasiliense* штамм 212 (NR_115173.1), *P. parmentieri* штамм RNS 08-42-1A (NR_153752.1), *P. wasabiae* штамм CFBP 3304 (NR_118293.1), *P. carotovorum* штамм ICMP 5702 (NR_116047.10), *P. atrosepticum* штамм LMG 2386 (NR_044980.1) и *Dickeya oryzae* штамм ZYY5 (NR_174300.1) был построен филогенетический древо с использованием метода ближайшего соседа (Neighbor-Joining) и программного обеспечения MEGA v. 10.2.6.

Для проведения инфекции картофельные клубни сорта «Винета» были стерилизованы снаружи 70 % этанолом. Бактерии выращивались в жидкой среде LB в течение ночи, центрифугировались, промывались раствором NaCl (0,85 %) и ресуспендировались в том же растворе до оптической плотности OD₆₀₀, соответствующей плотности клеток (3×10^8 клеток/мл). В 20 мкл суспензии бактерий вводились инъекционно с помощью шприца, и ранки изолировались парафильмом. Инфицированные клубни картофеля помещались при температуре 28°C и относительной влажности 70 %–80 %. Через 48 часов измерялась масса мацерированных тканей, кото-

рые затем хранились при температуре –20°C до момента измерения ферментативной активности. Стебли картофеля (сорт Винета) и клубни моркови подвергались тем же условиям.

Активность пектин-лиазы определялась по методу, описанному в работах [15, с. 179; 14, с. 569; 15, с. 190]. Активность целлюлазы определялась колориметрическим методом с использованием диниртосалициловой кислоты (DNS) [1, с. 177]. Измерение активности ферментов проводилось с использованием УФ-спектрофотометра «Cary 50 BIO» (США).

Результаты

Бактерии были выделены из заражённых картофеля, моркови и пекинской капусты, собранных в Беларуси. Из 102 исследованных образцов было предварительно выделено 7 штаммов бактерий. Изоляты были культивированы для описания их колоний на картофельном агаре и определения их рода и морфологии. Использовались следующие критерии: способность патогенов вызывать гниение клубней картофеля, гидролитическая активность по отношению к карбоксиметилцеллюлозе и предварительная идентификация пектиновой кислоты.

Пектинлиазы и целлюлазы являются ферментами, широко присутствующими как у сапрофитных, так и у фитопатогенных микроорганизмов, и играют ключевую роль в патогенности последних. Основным патогенным фактором является пектиназа. Выделение пектиназы во время инфицирования патогеном способствует деградаци и использованию пектина в межклеточном слое и клеточной стенке, что приводит к разрушению клеточной стенки, повреждению клеток и некрозу тканей [2, с. 180]. Целлюлазы в основном разрушают целлюлозу в первичной или вторичной клеточной стенке растительных клеток [16, с. 1525]. Основные целлюлазы, встречающиеся у патогенов черной ножки, включают гликозидные гидролазы, такие как эндо-β-1,4-глюканаза и эндо-β-1,3-глюканаза [8].

На основании вышеприведённых критериев были отобраны 7 штаммов, которым условно присвоены названия 98–1, 98–2, 101–2, 126, 127, 129 и 130. Согласно результатам физиологических и биохимических свойств (Таблица 1), штаммы 98–1, 98–2, 101–2, 126, 127, 129 и 130 были классифицированы как бактерии рода *Pectobacterium*.

Затем для амплификации ДНК штаммов 98–1, 98–2, 101–2, 126, 127, 129 и 130 были использованы специфичные праймеры BR1f и L1r, и все штаммы были подтверждены как *P. brasiliense* (Рисунок 1). Штамм 130 был выбран для секвенирования полного генома (GenBank: CP092039.1), и его геном был составлен с помощью программного

Таблица 1.

Физиологические и биохимические свойства изученных штаммов

Штамм	98-1	98-2	101-2	126	127	129	130
Грамм–отрицательность	–	–	–	–	–	–	–
Форма клеток	палочки						
Подвижность	+	+	+	+	+	+	+
O/F тест	F	F	F	F	F	F	F
Рост при 37°C	+	–	+	–	+	+	+
Рост при 28°C	+	+	+	+	+	+	+
Лецитиназа	–	–	–	–	–	–	–
Целлюлаза	+	+	+	+	+	+	+
Дегидрогеназа	+	+	+	+	+	+	+
Восстановление сахарозы	B	B	B	G	G	G	G
Ассимиляция алколей и углеводов							
Метил- α -D-глюкопираноза	–	–	–	–	–	–	–
Лактоза	+	+	+	+	+	+	+
Мальтоза	–	–	–	–	–	–	–
Арабиноза	+	+	+	+	+	+	+
Раффиноза	+	+	+	+	+	+	+
Кислота	+	+	+	+	+	+	+
Сорбит	–	–	–	–	–	–	–
Дульцит	–	–	–	–	–	–	–
Маннитол	+	+	+	+	+	+	+
Манноза	+	+	+	+	+	+	+
Рамноза	+	+	+	+	+	+	+
Органические кислоты							
Альфа-кетоглутаровая кислота	+	+	+	+	+	+	+
Натрий цитрат	+	+	+	+	+	+	+
Натрий тартрат	+	+	+	–	–	–	–

Примечание: «+» для признака/положительной реакции, «–» для отсутствия признака/отрицательной реакции, «R» для красного, «G» для зеленого, «B» для синего.

Штаммы *P. brasiliense*: 1–98-1; 2 — 98-2; 3 — 101-2; 4 — 126; 5 — 127; 6 — 129; 7 — 130; M — маркер ДНК (ДНК Ladder Mix Fermentas).

обеспечения Proksee (Рисунок 2). Филогенетический анализ на основе последовательности гена 16S рНК был проведён между штаммом 130 и пятью штаммами рода *Pectobacterium*: *P. brasiliense* штамм 212 (NR_115173.1), *P. parmentieri* штамм RNS 08-42-1A (NR_153752.1), *P. wasabiae* штамм CFBP 3304 (NR_118293.1), *P. carotovorum* штамм ICMP 5702 (NR_116047.10), *P. atrosepticum* штамм LMG 2386 (NR_044980.1) и *Dickeya oryzae* штамм ZYY5 (NR_174300.1), опубликованными в базе данных GenBank. Штамм 130 был уверенно отнесён к *P. brasiliense*, как показано на Рисунке 3.

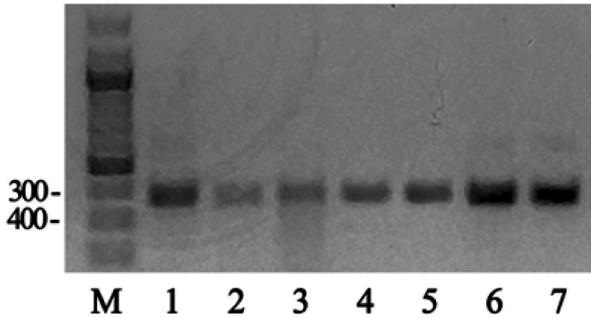


Рис. 1. Электроферограмма продуктов ПЦР с использованием праймеров BR1f и L1r

Секвенированные чтения были собраны в полный геном, который был затем оценен на наличие специфических для *P. brasiliense* признаков у штамма 130

и признаков для *P. brasiliense* признаков у штамма 130 (CP092039.1) с круговой хромосомой размером 5 034 872 п.н. и средней GC-составляющей 52.05 % (Таблица 2). В ходе сборки генома не были обнаружены плазмиды. Программное обеспечение Prodigal предсказало, что геном включает 4391 предполагаемую кодирующую последовательность (CDS), охватывающую в общей сложности 4 375 797 пар оснований (п.н.), со средней длиной гена 997 п.н. Также было предсказано, что геном содержит 184 тандемных повтора, общая длина которых составляет 22 683 п.н., что составляет 0.45 % от всего генома. В геноме было обнаружено 22 рНК-оперона, включающих 8 5S рНК, 7 16S рНК и 7 23S рНК.

Таблица 2.

Геномные характеристики штамма *P. brasiliense* 130

Характеристика	Значение
Размер генома (п.н.)	5,034,872
Содержание GC (%)	52.05
Количество предполагаемых генов CDS	4391
Длина гена (п.н.)	4,375,797
Средняя длина гена (п.н.)	997
Доля генов к размеру генома (%)	86.91

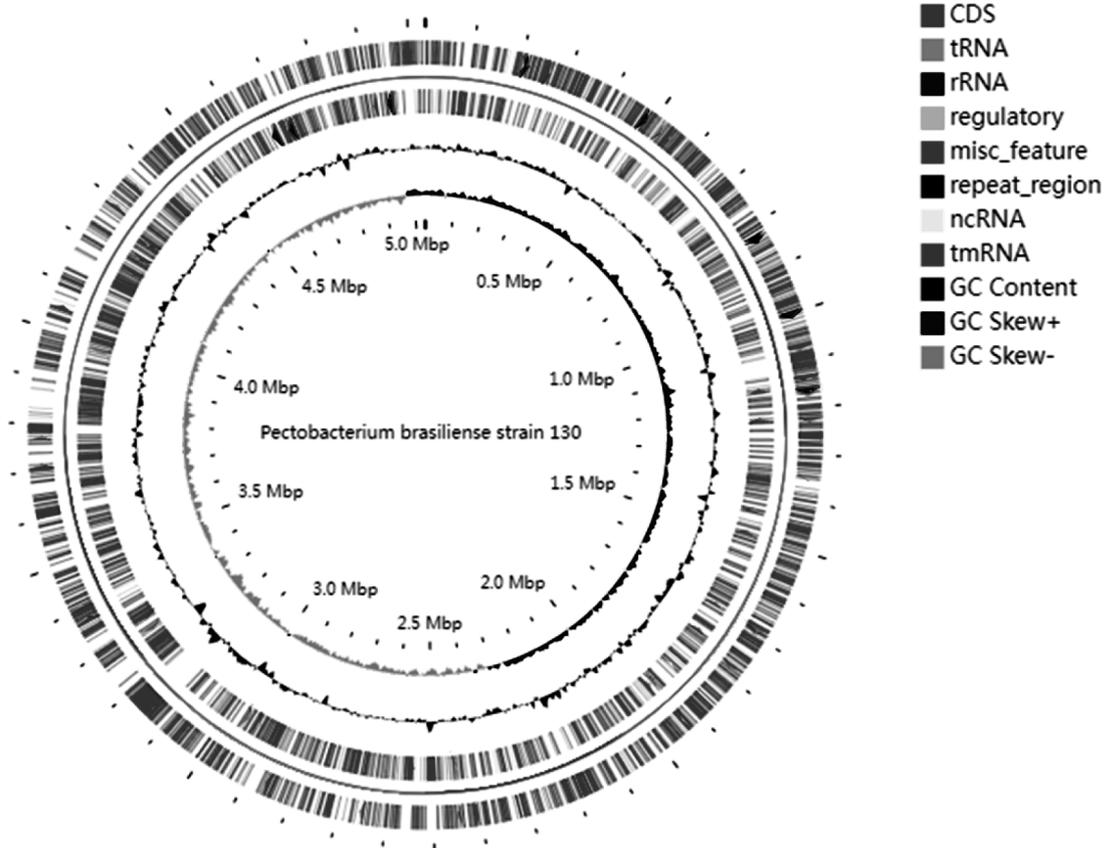


Рис. 2. Геномная карта *P. brasiliense* 130

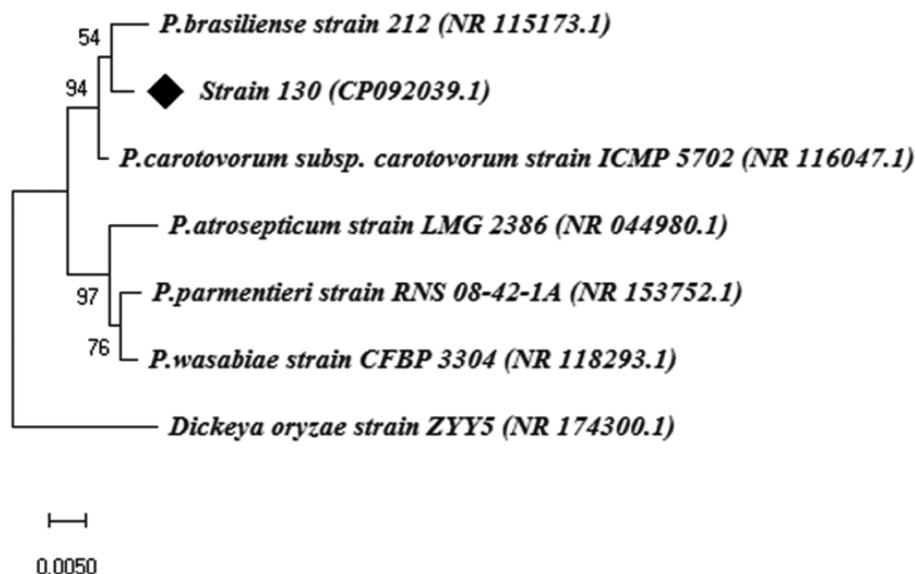


Рис. 3. Филогенетическое дерево, построенное путём сравнения фрагментов последовательностей гена 16S рРНК различных штаммов рода *P. brasiliense* с использованием метода ближайших соседей. Числа указывают процент бутстреп-значений (1000 повторений)

Характеристика	Значение
Длина межгенного региона (п.н.)	659,075
Доля межгенного региона к геному (%)	13.09
Количество тандемных повторов	184
Длина тандемных повторов (п.н.)	22,683
Доля тандемных повторов к геному (%)	0.4505
Количество минисателлитных ДНК	199
Количество микросателлитных ДНК	10
Количество рРНК	22
Количество тРНК	79
Количество сРНК	40

Бактерии были инокулированы в картофельные клубни, морковь, пекинскую капусту и лук, при этом симптомы заболевания появлялись в течение 2–7 дней. Результаты показали, что штамм 98–2 не вызывал заболевания у лука, тогда как штамм 101–2 не вызывал заболевания у моркови, пекинской капусты или лука. Другие растительные образцы продемонстрировали явные симптомы заболевания, включая некроз, почернение и водянистость клубней и листьев. Из заражённых тканей растений были выделены бактерии. Далее в инфицированных тканях были измерены активности пектатлиазы и целлюлазы (Таблица 3 и Таблица 4). Пектатлиаза считается основным фактором вирулентности видов рода *Pectobacterium*.

Таблица 3.

Активность пектатлиазы у бактерий *P. brasiliense* в поражённых тканях растений (Е/мл).

Штамм	Картофель	Морковь	Пекинская капуста	Лук
98-1	0.113±0.013	0.106±0.009	0.378±0.098	0.005±0.002
98-2	0.151±0.021	0.087±0.023	0.411±0.056	—
101-2	0.152±0.031	—	—	—
126	0.543±0.02	0.021±0.01	0.594±0.14	0.005±0.002
127	0.222±0.013	0.035±0.002	0.227±0.037	0.017±0.003
129	0.23±0.117	0.106±0.044	0.334±0.072	0.052±0.023
130	0.26±0.022	0.121±0.022	0.359±0.076	0.014±0.005

Примечание: «—» для отсутствия данных о заражении.

Таблица 4.

Активность целлюлазы у бактерий *P. brasiliense* в поражённых тканях растений (мг/1ч/1мл)

Штамм	Картофель	Морковь	Пекинская капуста	Лук
98-1	0.359±0.055	13.588±0.316	1.648±0.449	9.934±0.483
98-2	0.319±0.002	8.776±0.614	2.489±0.319	—
101-2	0.572±0.046	—	—	—
126	0.607±0.04	16.016±0.982	1.824±0.387	5.601±0.289
127	0.898±0.046	14.8±0.111	1.434±0.275	13±0.485
129	0.385±0.037	3.525±0.087	2.036±0.065	12.236±0.762
130	0.4±0.009	3.728±0.118	2.024±0.236	10.816±0.007

Примечание: «—» для отсутствия данных о заражении.

Обсуждение и выводы

Бактериальная мягкая гниль растений представляет собой заболевание, наносящее серьёзный ущерб сельскому хозяйству, и для его контроля на сегодняшний день отсутствуют эффективные биологические меры. *Pectobacterium*, как основной возбудитель данного заболевания, вызывает большой интерес ввиду широкого распространения и многообразия видов. За последние 20 лет, благодаря развитию аналитических технологий, многие виды и роды бактерий из семейства *Pectobacteriaceae* подверглись пересмотру и были заново классифицированы [Li 2018; Huang 2018; Duarte 2004].

Классификация рода *Pectobacterium* долгое время оставалась спорной, поскольку этот род бактерий демонстрирует высокую степень фенотипической и генетической изменчивости, а также патогенности, что позволяет им вызывать тяжёлую мягкую гниль у множества различных растений-хозяев. Наши исследования показали, что семь штаммов *P. brasiliense* были впервые идентифицированы в Беларуси с помощью молекулярно-генетического анализа. Ранее этот патоген не был зарегистрирован в данном регионе. Эти результаты закладывают основу для дальнейшего понимания генети-

ческой информации *P. brasiliense* и предоставляют важные данные для будущих исследований.

В ходе наших экспериментов этот патоген успешно инфицировал картофельные клубни, морковь, пекинскую капусту и лук, быстро распространяясь в поражённых тканях. Известные данные указывают на то, что *P. brasiliense* может поражать широкий спектр культурных растений, причём наибольшую опасность он представляет для паслёновых культур [9]. Учитывая его способность заражать множество сельскохозяйственных культур и высокую вирулентность, можно предположить, что *P. brasiliense* представляет потенциальную угрозу для сельского хозяйства Беларуси, особенно для выращивания паслёновых культур.

Наши данные подтверждают, что *P. brasiliense* является значимым патогеном, представляющим серьёзную опасность для сельскохозяйственных культур, и дальнейшие исследования его генома и патогенности позволят разработать меры по его эффективному контролю. Кроме того, полученные результаты подтверждают, что *P. brasiliense* демонстрирует высокую степень изменчивости как на уровне генома, так и на уровне фенотипических проявлений, что усложняет его идентификацию и контроль.

ЛИТЕРАТУРА

- Lindsay H.A. colorimetric estimation of reducing sugars in potatoes with 3,5-dinitrosalicylic acid. *Potato Res.* 1973;16(3):176-179. doi:10.1007/BF02356048
- McMillan G.p., Barrett A.m., Pérombelon M.c.m. An isoelectric focusing study of the effect of methyl-esterified pectic substances on the production of extracellular pectin isoenzymes by soft rot *Erwinia* spp. *Journal of Applied Bacteriology.* 1994;77(2):175-184. doi:10.1111/j.1365-2672.1994.tb03062.x
- An C.L., Lim W.J., Hong S.Y., et al. Analysis of bgl operon structure and characterization of beta-glucosidase from *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* LY34. *Biosci Biotechnol Biochem.* 2004;68(11):2270-2278. doi:10.1271/bbb.68.2270
- Duarte V., De Boer S.H., Ward L.J., de Oliveira A.M.R. Characterization of atypical *Erwinia carotovora* strains causing blackleg of potato in Brazil. *Journal of Applied Microbiology.* 2004;96(3):535-545. doi:10.1111/j.1365-2672.2004.02173.x
- Panda P., Fiers M., Armstrong K., Pitman A.R. First report of blackleg and soft rot of potato caused by *Pectobacterium carotovorum* subsp. *brasiliensis* in New Zealand. *New Dis Rep.* 2012;26(15):2044-0588. doi: https://doi.org/10.5197/j.2044-0588.2012.026.015
- Onkendi E.M., Maluleke L.N., Moleleki L.N. First report of *Pectobacterium carotovorum* subsp. *brasiliense* causing soft rot and blackleg of potatoes in Kenya. *Plant Disease.* 2014;98(5):684-684. doi: https://doi.org/10.1094/PDIS-09-13-0988-PDN
- de Werra P., Bussereau F., Keiser A., Ziegler D. First report of potato blackleg caused by *Pectobacterium carotovorum* subsp. *brasiliense* in Switzerland. *Plant Dis.* 2015;99(4):551. doi: https://doi.org/10.1094/PDIS-07-14-0742-PDN
- Arizala D., Arif M. Genome-wide analyses revealed remarkable heterogeneity in pathogenicity determinants, antimicrobial compounds, and CRISPR-cas systems of complex phytopathogenic genus *Pectobacterium*. *Pathogens.* 2019;8(4):247. doi: https://doi.org/10.3390/pathogens8040247
- Oulghazi S., Sarfraz S., Zaczek-Moczydłowska M.A., et al. *Pectobacterium brasiliense*: Genomics, host range and disease management. *Microorganisms.* 2021;9(1):106. doi: https://doi.org/10.3390/microorganisms9010106
- van der Merwe J.J., Coutinho T.A., Korsten L., van der Waals J.E. *Pectobacterium carotovorum* subsp. *brasiliensis* causing blackleg on potatoes in South Africa. *European Journal of Plant Pathology.* 2010;126(2):175-185. doi: https://doi.org/10.1007/s10658-009-9531-2
- Hauben L., Moore E.R., Vauterin L., et al. Phylogenetic position of phytopathogens within the Enterobacteriaceae. *Systematic and applied microbiology.* 1998;21(3):384-397. doi: https://doi.org/10.1016/S0723-2020(98)80048-9
- Pérombelon M.C.M. Potato diseases caused by soft rot erwinias: an overview of pathogenesis. *Plant Pathology.* 2002;51(1):1-12. doi: 10.1046/j.0032-0862.2001.Shorttitle.doc.x
- Hyatt D., Chen G.L., LoCascio P.F., Land M.L., Larimer F.W., Hauser L.J. Prodigal: prokaryotic gene recognition and translation initiation site identification. *BMC Bioinformatics.* 2010;11(1):119. doi:10.1186/1471-2105-11-119
- Macmillan J.D., Vaughn R.H. Purification and Properties of a Polygalacturonic Acid-trans-eliminase Produced by *Clostridium multifementans**. *Biochemistry.* 1964;3(4):564-572. doi:10.1021/bi00892a016

15. Evtushenkov A.N., Shevchik V.E., Popova L.B., et al. Purification and properties of two extracellular endopeptidase lyases from *Erwinia chrysanthemi* strain 49. *Prikladnaia Biokhimiia i Mikrobiologija*. 1986;22(2):187–192. Accessed March 1, 2024. <https://eurekamag.com/research/006/230/006230632.php>
16. Boccara M., Jean-Luc Aymeric, Christel Camus. Role of endoglucanases in *Erwinia chrysanthemi* 3937 virulence on *Saintpaulia ionantha*. *Journal of bacteriology*. 1994;176(5):1524–1526. doi: [https://doi.org/10.1128/jb.176.5.1524–1526.1994](https://doi.org/10.1128/jb.176.5.1524-1526.1994)
17. Marquez-Villavicencio M. del P., Groves R.L., Charkowski A.O. Soft rot disease severity is affected by potato physiology and *Pectobacterium* taxa. *Plant Disease*. 2011;95(3):232–241. doi: <https://doi.org/10.1094/PDIS-07-10-0526>
18. Toth I.K., Bell K.S., Holeva M.C., Birch P.R. Soft rot *Erwinia*: from genes to genomes. *Mol Plant Pathol*. 2003;4(1):17–30. doi:10.1046/j.1364-3703.2003.00149.x
19. Charkowski A., Blanco C., Condemine G., et al. The Role of Secretion Systems and Small Molecules in Soft-Rot Enterobacteriaceae Pathogenicity. *Annual Review of Phytopathology*. 2012;50(1):425–449. doi:10.1146/annurev-phyto-081211-173013
20. Евтушенков А.Н., Фомичев Ю.К. Пектатлиазная активность бактерий рода *Erwinia*. *Вестник Белорусского Государственного Университета Имени Ви Ленина Серия 2: Химия Биология География*. 1978;(2):187–192. Accessed December 14, 2022. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38097272>

© Шао Чэньюе (520095424@qq.com); Евтушенков Анатолий Николаевич (Evtushenkov@bsu.by)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ПРЕИМУЩЕСТВА ПЕРЕХОДА НА СИСТЕМУ ЭЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ BLOCKCHAIN В ВЫСШЕМ УЧЕБНОМ ЗАВЕДЕНИИ

Алтынников Максим Сергеевич

Аспирант, Иркутский Государственный
Университет Путей Сообщения
altynnikovms@yandex.ru

POWER PLANETARY ELECTRIC DRIVES FOR LOCK BODIES OF PIPELINE TRANSPORT

M. Altynnikov

Summary. The article explores the prospects of integrating blockchain technology into electronic document management systems (EDMS) in higher education institutions to enhance the security, transparency, and efficiency of data management. The current methods of file transfer in universities are analyzed using the example of the State University of Railway Transport, highlighting their shortcomings related to security and risks of information leakage. As a solution, the integration of IBM Blockchain technology is proposed, offering decentralized data storage and secure document access through cryptographic methods. Special attention is given to the consensus algorithm (Proof-of-Work) and the architecture of the proposed system, which can be utilized to automate and increase trust in the management of academic and administrative processes.

Keywords: systems analysis, blockchain, electronic document management, higher education institutions, data security, decentralization, IBM Blockchain, Proof-of-Work, data management, automation, cryptography.

Аннотация. В статье рассматриваются перспективы внедрения технологии блокчейн в системы электронного документооборота (СЭД) высших учебных заведений для повышения безопасности, прозрачности и эффективности управления данными. Анализируются текущие методы передачи файлов в вузах на примере Государственного университета путей сообщения, выявляются их недостатки, связанные с безопасностью и рисками утечек информации. В качестве решения предлагается интеграция технологии IBM Blockchain, которая обеспечивает децентрализованное хранение данных и защищённый доступ к документам через криптографические методы. Особое внимание уделено алгоритму консенсуса (Proof-of-Work) и архитектуре предложенной системы, которая может быть использована для автоматизации и повышения доверия в управлении учебными и административными процессами.

Ключевые слова: системный анализ, блокчейн, электронный документооборот, высшие учебные заведения, безопасность данных, децентрализация, IBM Blockchain, Proof-of-Work, управление данными, автоматизация, криптография.

Современные высшие учебные заведения активно внедряют цифровые технологии для оптимизации процессов управления, включая системы электронного документооборота (СЭД) [1]. Традиционные СЭД уже доказали свою эффективность, однако с ростом объема данных, повышением требований к прозрачности, безопасности и подлинности информации возникает необходимость в более передовых решениях. В данном контексте технология блокчейн представляет собой перспективное направление развития СЭД, обеспечивая децентрализованную структуру, неизменяемость данных и высокий уровень защиты.

Блокчейн-сеть содержит распределенный реестр, который записывает все транзакции, которые происходят в сети [2]. Поэтому блокчейн-сеть часто описывается как децентрализованная, потому что он реплицируется среди многих участников сети, каждый из которых сотрудничает в ее обслуживании. Также отмечается, что децентрализация и сотрудничество являются мощными атрибутами, которые отражают то, как предприятия обмениваются товарами и услугами в реальном мире. Помимо

децентрализации и совместной работы, информация, записанная в блокчейне, является только дополнением, с использованием криптографических методов, которые гарантируют, что после добавления транзакции в бухгалтерскую книгу она не может быть изменена. Это свойство «неизменяемости» упрощает определение происхождения информации, потому что участники могут быть уверены, что информация не была изменена после факта. Вот почему блокчейны иногда описывают как системы доказательств. IBM Blockchain — это полностью интегрированная корпоративная блокчейн-платформа, предназначенная для ускорения разработки, управления и эксплуатации многоучрежденческой бизнес-сети: с помощью IBM Blockchain разработчики могут использовать инструмент под названием Hyperledger Composer [3] для быстрого создания блокчейн-приложения, которое является высокозащищенным и функциональным в среде IBM Cloud.

Настоящая статья посвящена анализу преимуществ и вызовов при переходе системы электронного доку-

ментооборота в высших учебных заведениях на блокчейн, а также обсуждению ключевых аспектов его внедрения для повышения эффективности и безопасности процессов управления данными.

Анализ существующей системы

Передача файлов в управлении высшего учебного заведения требует высокого уровня безопасности и строгих мер для предотвращения утечек или несанкционированного доступа к документам. В качестве примера было выбрано тематическое исследование Государственного Университета Путей Сообщения, где проанализированы методы обмена файлами между администрацией. Установлено, что учреждение использует традиционные способы обработки и передачи данных, что сказывается на общей производительности.

Сотрудники преимущественно обмениваются файлами через электронную почту или другие инструменты, такие как flash-накопители. Также используется внутренняя единая система с функцией документооборота.

Единая информационная система (ЕИС) в Иркутском государственном университете путей сообщения (ИрГУПС) предназначена для автоматизации учебного процесса, управления документами и другими административными задачами. Основные компоненты и функции такой системы могут включать:

1. Система управления учебным процессом:
 - Электронное расписание: Управление и отображение расписания занятий для студентов и преподавателей.
 - Электронный журнал успеваемости: Ведение и отслеживание оценок, отчетов о посещаемости, а также формирование ведомостей.
 - Личный кабинет студента: Предоставление информации о текущей успеваемости, доступ к учебным материалам, возможность регистрации на курсы или экзамены.
 - Личный кабинет преподавателя: Управление образовательным процессом, размещение учебных материалов, ведение электронного журнала.
2. Электронный документооборот:
 - Автоматизация процессов оформления, подписания и хранения документов в цифровом виде.
 - Поддержка систем электронных заявлений, приказов и других официальных документов.
3. Система управления контингентом студентов:
 - Ведение баз данных студентов, включая информацию о зачислении, успеваемости, перемещении по курсам и выпуска.
 - Отслеживание академических отпусков, переводов, отчислений и восстановлений.
4. Система поддержки учебных ресурсов:

- Электронная библиотека: Доступ к учебной литературе, научным статьям и другим образовательным ресурсам.
 - Система дистанционного обучения: включает платформу для проведения онлайн-курсов, лекций и семинаров, тестирования и сдачи экзаменов дистанционно.
5. Учет и автоматизация финансовых операций, связанных с оплатой обучения, стипендиями и иными финансовыми потоками.
 6. Поддержка разработки учебных планов, распределения учебных часов и нагрузки среди преподавателей, планирования экзаменационных сессий.
 7. Модули для управления кадровыми ресурсами, распределением аудиторий, администрирования инфраструктуры университета.

ЕИС в ИрГУПС объединяет все эти компоненты в единую систему для более эффективного управления учебными и административными процессами.

В процессе анализа выявлено, что безопасность этих методов не всегда на должном уровне, особенно при передаче конфиденциальных документов. Иногда члены коллектива или сотрудники могут изменять содержимое общих файлов. Помимо этого, для доставки сообщений и документов между офисами университет использует курьеров, что также представляет риск, так как файлы могут быть обработаны ненадлежащим образом, что приводит к утечкам важной информации.

Таким образом, необходимо внедрение защищенной системы управления и обмена файлами, которая обеспечит более надежную передачу документов между руководителями различных подразделений. На рисунке 1 показан процесс обмена файлами в существующей системе, что подчеркивает необходимость модернизации для улучшения безопасности и эффективности.

Анализ предлагаемой системы

Программное обеспечение позволит организации безопасно передавать конфиденциальные файлы и документы между сотрудниками, участвующими в процессе, для удаленного общения и, как следствие, повысит качество предоставляемых услуг и общую производительность. Разрабатываемая система будет использовать архитектуру IBM Blockchain, что обеспечит высокий уровень безопасности файлов и гарантирует, что доступ к ним будет предоставлен только тем участникам, которые действительно имеют интерес к этой информации. Перед внесением изменений в файл потребуется его проверка и разрешение от соответствующего участника сети.

Архитектура блокчейна работает на основе децентрализованного реестра, что позволяет хранить данные

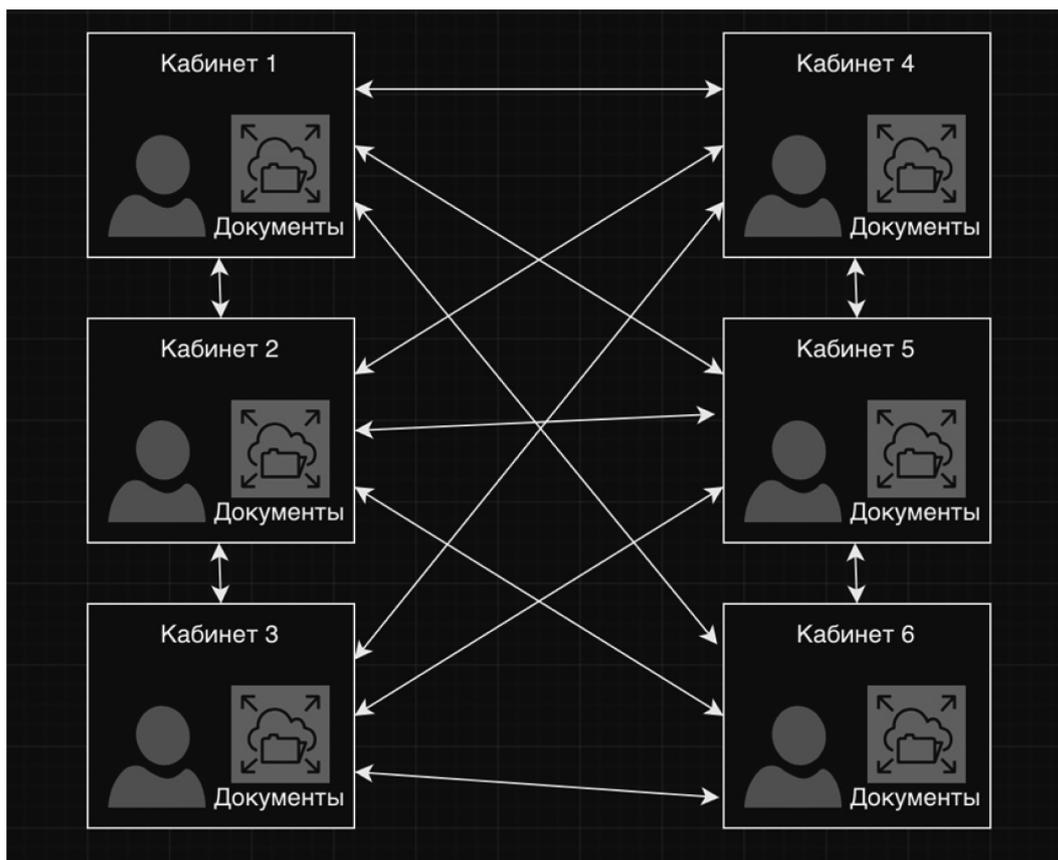


Рис. 1. Механизм обмена информацией внутри учреждения с помощью различных офисных мессенджеров

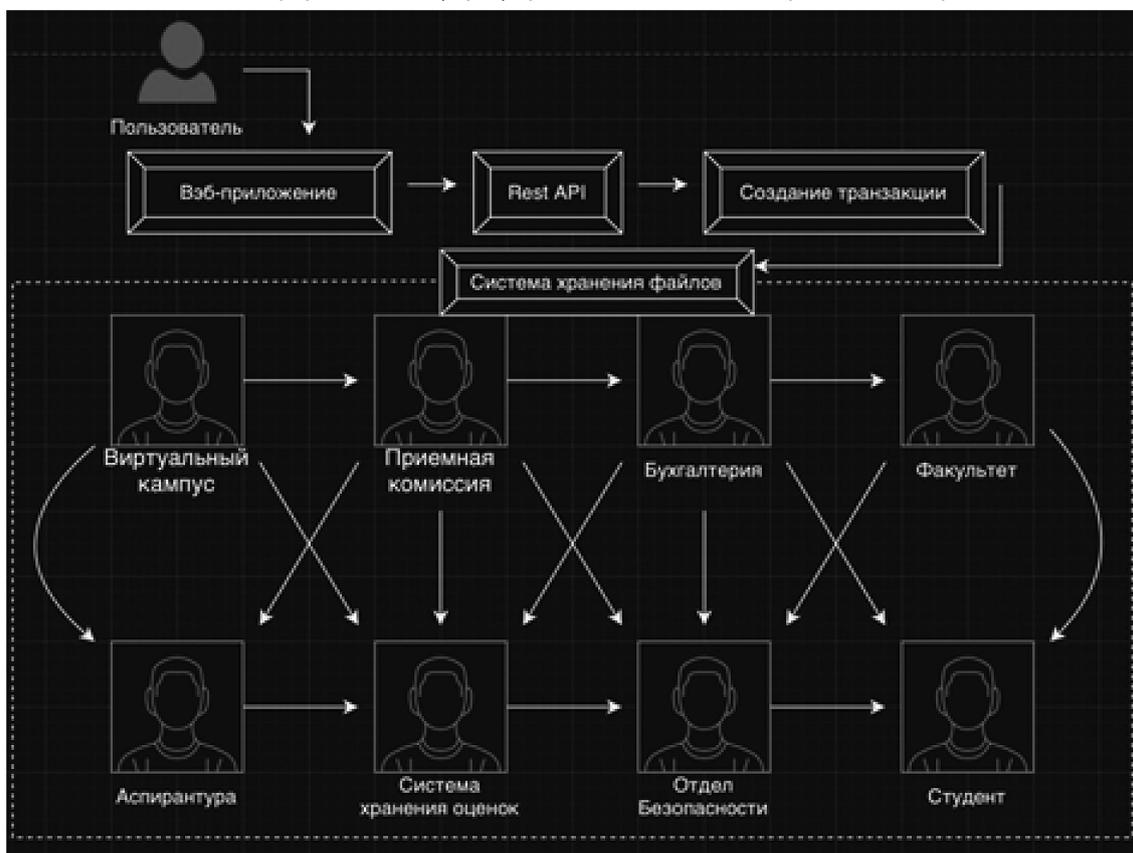


Рис. 2. Предлагаемая архитектура системы

в глобальной сети, обладающей открытым доступом и защищенной от фальсификации со стороны неучастников. IBM Blockchain Network предоставляет каждому участнику сети два ключа: приватный и публичный. Когда участник хочет поделиться файлом с другим отделом или офисом, он сначала шифрует файл с использованием публичного ключа. Этот процесс рассматривается как создание блока, после чего файл передается всем разрешенным участникам в сети, т.е. утвержденным сотрудникам, которые могут открыть общий файл с помощью своих индивидуальных приватных ключей.

Участники сети подтверждают файл как действительный (консенсус), после чего файл добавляется и хранится в общей книге блокчейна. В результате передача файла между отделами обновляет мировое состояние.

Пользователь открывает веб-приложение, после чего выбирает файл для совместного использования. Процесс шифрования осуществляется с помощью REST API, который затем вызывает службу заказа для проверки и согласования последовательности транзакций. Эта служба распределяет блоки файлов среди разрешенных коллег по управлению в гипер-регистре. Далее участники сети подтверждают (консенсус) файлы как действительные, после чего файл добавляется к цепочке в общей базе документов и обновляется мировое состояние. Рисунок 2 иллюстрирует процесс предлагаемой архитектуры системы.

Алгоритм Proof-of-Work (PoW) является одним из самых известных механизмов достижения консенсуса в блокчейн-технологиях, который используется, например, в Bitcoin. Основная идея PoW заключается в том, что участники сети (майнеры) должны решать сложные математические задачи, чтобы иметь возможность добавлять новые блоки в блокчейн.

- Ниже приведён псевдокод, который описывает основные шаги алгоритма Proof-of-Work:
- Начало программы: Программа запускается.
- Запуск приложения пользователем: Пользователь запускает приложение.
- Запуск REST API: Инициализация REST API.

- Открытие модуля входа: открывается модуль для входа пользователя.
- Проверка данных для входа: если данные для входа верны:
 - Открытие панели управления: Пользователь получает доступ к панели управления.
 - Выбор файла для загрузки: Пользователь выбирает файл для загрузки.
 - Шифрование файла: Файл шифруется.
 - Передача файла всем участникам сети: Файл делится со всеми участниками сети.
 - Проверка на валидность: если файл валиден:
- Декодирование файла участниками: Все участники добавляют валидацию и расшифровывают файл.
- Достигнут консенсус: Консенсус достигнут среди всех участников сети.
 - Если файл не валиден, происходит сбой сети, и выводится сообщение о подделке файла.
- Если данные для входа неверны, выводится сообщение об ошибке, и программа завершается.

Следовательно, чтобы эффективно объяснить, как алгоритм консенсуса (Proof-of-Work), показанный на рисунке 3, был применён в предлагаемой системной архитектуре, был принят алгоритм псевдокода (PSUEDOCODE), в то время как рисунок 4 иллюстрирует предложенную UML-диаграмму случаев использования системы для различных платформ и их привилегий.

Следовательно, данный анализ интеграции блокчейна в обмен и управление файлами в высших учебных заведениях приносит значительные результаты не только в аспекте безопасности данных, но и в укреплении доверия и уверенности в принятии решений на уровне управления. Этот анализ также показывает, что в виртуальном режиме технология блокчейн может быть принята в других областях образования, таких как оплата школьных сборов, точное и безопасное ведение учета, преподавание и обучение, а также система транскриптов и оценок студентов. В заключение исследователь предлагает внедрить технологию блокчейн в образовательную систему для улучшения стандартов обработки и обмена информацией в этом секторе.

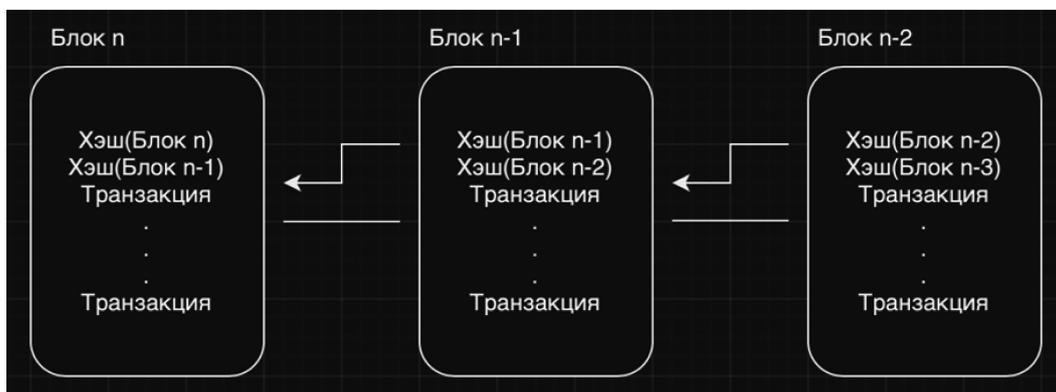


Рис. 3. Алгоритм консенсуса (Proof-of-Work) (Источник: [5])



Рис. 4. Пользовательская диаграмма UML для предлагаемой системы

ЛИТЕРАТУРА

1. Генкин Артем, Михеев Алексей. Блокчейн. Как это работает и что ждет нас завтра. М.: Альпина Паблицер, 2017. 592 с.
2. Блокчейн: определение, блоки транзакций и применение вне сферы криптовалют [Электронный ресурс] URL: hr-portal.ru/varticle/blokcheyn-opredelenie-bloki-tranzakciy-i-primeneniye-vne-sfery-kriptovalyut (дата обращения: 10.9.2024).
3. Архитектура IBM Hyperledger Fabric. [Электронный ресурс]: URL <https://www.ibmskillsacademy.com/>.
4. Алтынников М.С., Любимцев В.И. Роль системного анализа в бизнесе // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. — 2023. — Т. 8 No 3(29) — С. 44–49.
5. Consensus Algorithm (Proof-of-Work). [Электронный ресурс] URL: <https://cointelegraph.com/explained/proof-of-work-explained> (дата обращения: 15.9.2024).
6. Дегтярев Ю.Н. Системный анализ и исследование операций // учебник. М.: Высш. шк., 1996. — С. 335.
7. Cynthia Dwork, Moni Naor Pricing via Processing or Combatting Junk Mail // The Weizmann Institute of Science [Электронный ресурс] URL: wisdom.weizmann.ac.il/~naor/PAPERS/pvp.pdf (дата обращения: 4.9.2024)
8. Абрамов Чернышов В.Н., Чернышов А.В. Теория систем и системный анализ: учеб. пособие. // Тамбов: Изд-во Тамбов. гос. техн. ун-та, 2008. — С. 96.
9. Георгица И.В., Гончаров С.А., Мохов В.А. Мультиагентное моделирование сетевой атаки типа DDoS // Инженерный вестник Дона, 2013, №3.

© Алтынников Максим Сергеевич (altynnikovms@yandex.ru)
 Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ОКУЛОГРАФИИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННОГО ИНТЕРФЕЙСА

USING EYE-TRACKING DATA IN HUMAN-MACHINE INTERFACE DESIGN

G. Boyarsky
D. Cherny

Summary. This paper explores the possibility of using eye-tracking technology in the development of new display systems and their integration into prospective passenger aircraft cockpits. The research environment includes proprietary display simulation software, a custom outside-the-cockpit visualization system, and the X-Plane flight simulator (by Laminar Research). When designing new types of indicators, challenges arise regarding the optimal layout of display patterns on the screen, as well as the validation of the quality and usability of the display system's logic, color schemes, and animation solutions. To enable independent assessment of these parameters, software was developed to collect information on the operator's gaze position on the indicator screen, the frequency of gaze fixation on critical instrument parameters, and subsequent analysis of this data. The technology was integrated into a prototype cockpit of a supersonic passenger aircraft.

Keywords: Eye Tracking, oculography, aviation ergonomics, flight safety.

Боярский Глеб Геннадьевич

кандидат технических наук, ведущий инженер, Центр «Авионика» (МАИ) Московский авиационный институт
glebboyarsky@gmail.com

Черный Денис Юрьевич

магистрант, Российский Университет транспорта
mosavia.dc@gmail.com

Аннотация. В работе исследуется возможность применения технологии отслеживания взгляда при разработке новых систем индикации и их интеграции в перспективные кабины пассажирских самолетов. В качестве среды исследований использовано собственное программное обеспечение для моделирования индикации, собственная система визуализации внекабинного пространства, а также авиасимулятор X-Plane (производства Laminar Research). При разработке новых типов индикаторов возникает задача оптимальной компоновки индикационных паттернов на экране индикатора, подтверждения качества, удобства логики работы индикационной системы, цветовых, схемных и анимационных решений. В интересах реализации независимой оценки этих параметров было разработано программное обеспечение, обеспечивающие сбор информации о положении взгляда оператора на экране индикатора, частоте фиксации взгляда на контрольных параметрах приборов и последующий их анализ. Технология была интегрирована в стенд-прототипирования кабины сверхзвукового пассажирского самолёта.

Ключевые слова: Eye Tracking, окулография, авиационная эргономика, безопасность полетов.

Введение

В течение всего полета экипажу необходимо контролировать множество параметров полёта. Для отображения информации подходят только визуальная, звуковая и тактильная формы представления [1]. При этом большую часть информации экипаж получает по средствам визуальной формы представления. Так, по данным отчета NTSB об авиационных происшествиях с 1978 по 1990 год [2], неправильное и несвоевременное чтение показаний приборов стали причиной более чем в 80 % происшествий.

Следовательно задача состоит в том, чтобы улучшить процесс взаимодействия экипажа и воздушного судна путем рассмотрения процессов потери внимания, когнитивных процессов, лежащих в основе пилотирования. Данные, получаемые от *eye-tracker'a*, позволяют определить основные глазодвигательные события, например фиксацию человеком значения индикатора, изменения фокуса, возникновение туннельного эффекта. Данные процессы лежат в основе чтения человеком информа-

ции и принятия критически важных решений по управлению воздушным судном.

Системы отслеживания взгляда активно применяются в исследованиях вопросов эргономики, а также на предмет более быстрой, альтернативной системы управления воздушном судном [3]. Они позволяют контролировать факт чтения экипажем параметров от систем отображения информации (СОИ). Визуальный контроль параметров полета и навыки пилотирования являются критическими важными для безопасности полета [4]. Актуальность работы подтверждается неоднократными рекомендациями Межгосударственного авиационного комитета по разработке комплексных программ оценки влияния человеческого фактора на безопасность полетов [5].

Методология

Разработка программных модулей для определения положения взгляда оператора

На текущий момент доступны два принципиально разных вида *eye-tracker'ов*:

1. Носимые — такие устройства надеваются на оператора и находятся на его голове, в течение всего исследования;
2. Дистанционные — данные устройства могут устанавливаться в необходимых для исследования местах и никак не влияют на работу оператора.

В данной работе, для определения позиции точки взгляда на СОИ используется дистанционный *eye-tracker*, который применяет безопасное для человека инфракрасное излучение для создания бликов на поверхности глаза, затем камеры делают высокоскоростные снимки глаз и искусственно создаваемых бликов. *Eye-tracker* выдает информацию о взгляде в 2D-системе координат, выравненной с активной областью отображения информации. Активной областью называется область отображения информации, исключая рамку монитора (индикатора). Точкой отсчета (левой верхней точкой) координат является левый верхний угол области монитора, а правой нижней точкой будет являться точка с координатами x и y , где x — ширина монитора, y — высота монитора.

В качестве данных, получаемых от датчика, выступают координаты точки положения взгляда и временная

отметка этой точки. Программный комплекс разделен на два модуля:

1. Модуль, который получает информацию от *eye-tracker*'а, а затем отправляет принимающему модулю по сетевому протоколу *UDP*, информацию о положении взгляда;
2. Модуль, принимающий информацию о положении взгляда. Данный модуль визуализирует положение взгляда в режиме реального времени, позволяя накладывать его на различные изображения индикации, записывает сессию, используется для последующего анализа проведенной сессии.

Данный подход обеспечивает легкость интеграции системы в стенды, независимость получаемых данных от физической конфигурации стенда. Схематическое изображение получения и обработки данных представлено на рис. 1.

Получение информации с eye-tracker'а, отправка данных по сети

При организации исследовательских стендов не редки случаи, когда стенд формируется из комплекса раз-

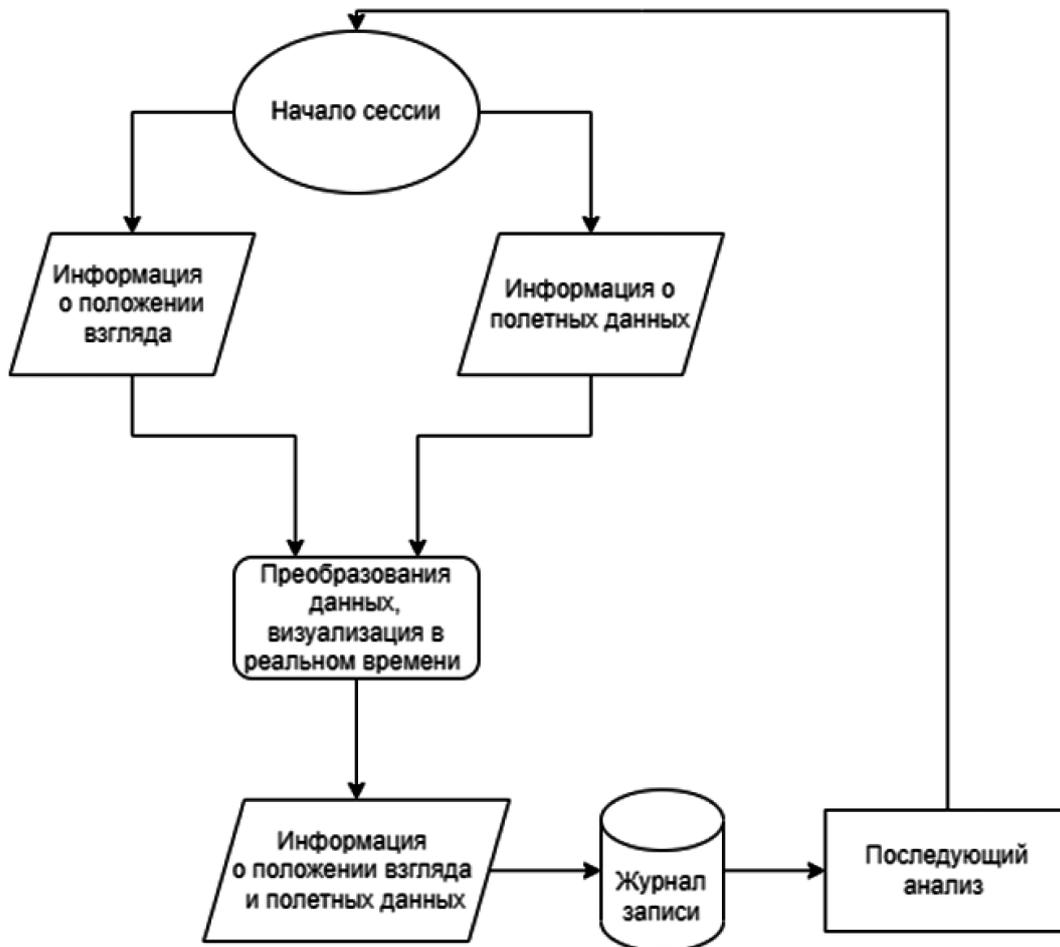


Рис. 1. Получения и обработки данных

розненных вычислительных машин и средств отображения информации, объединенных между собой локальной высокоскоростной информационной сетью. В этом случае необходимо организовать корректную передачу и отображение параметров виртуальных индикаторов, отображающихся на СОИ с учетом их пространственного положения и физических размеров. Последняя необходимость может возникать в зависимости от типа используемого *eye-tracker'a*.

В случаях, когда используется дистанционный *eye-tracker* (размещаемый на СОИ), для получения координат положения точки взгляда, исходные данные о положении точки взгляда необходимо преобразовать к нормализованной системе координат.

Преобразование выполняется путем пропорционального изменения выходных координат положения точки взгляда от *eye-tracker'a*. Этот подход позволяет принимающему модулю выводить изображение точки взгляда независимо от конфигурации и габаритов стенда. Для перехода к нормализованным координатам применяются формулы 1.1 и 1.2 соответственно.

$$x_{norm} = x_1 \cdot \frac{2}{\text{ширина СОИ}} - 1, \quad (1.1)$$

где x_1 — текущая x координата положения взгляда.

$$y_{norm} = y_1 \cdot \frac{2}{\text{высота СОИ}} - 1, \quad (1.2)$$

где y_1 — текущая y координата положения взгляда.

Схематическое изображение системы координат представлено на рис. 2 [6].

Прием, обработка и хранение данных о положении взгляда

Для взаимодействия с *eye-tracker'ом* используется *Tobii Core SDK* для платформы *.NET Core*. Платформой для клиентского приложения служит технология *WPF*.

Прием данных

Координаты положения точки взгляда, поступающие по *Ethernet* кабелю, находятся в пределах от $[-1, 1]$ до $[1, 1]$.

Для корректного отображения данных о положении взгляда необходимо применить обратные преобразования и тем самым привести координаты от нормализованного вида к экранным. Одновременно с данными о положении взгляда, поступает видеопоток с исследовательского стенда. Синхронизация видеопотока и информации о положении взгляда осуществляется с использованием алгоритма на основе временных отметок. Для воспроизведения и транскодирования видеопотока в реальном времени применяется набор сводных библиотек с открытым исходным кодом *Fmpeg*, встроенных в принимающий модуль программного обеспечения. Поверх схемы индикации накладывается положение точки взгляда, что позволяет определить текущий считываемый оператором параметр. Пример диалогового окна, отображающего видеопоток и соответствующую схему индикации с отображением текущего положения точки взгляда, приведен на рис.3.

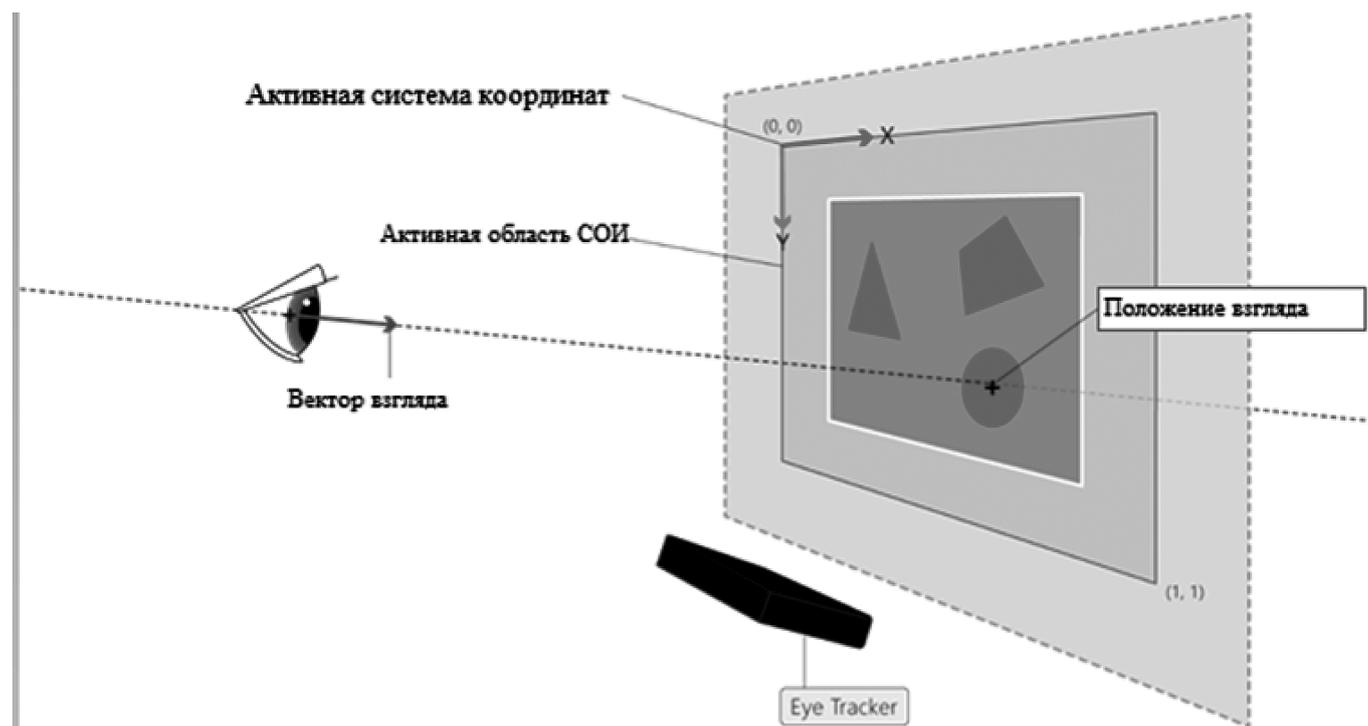


Рис. 2.

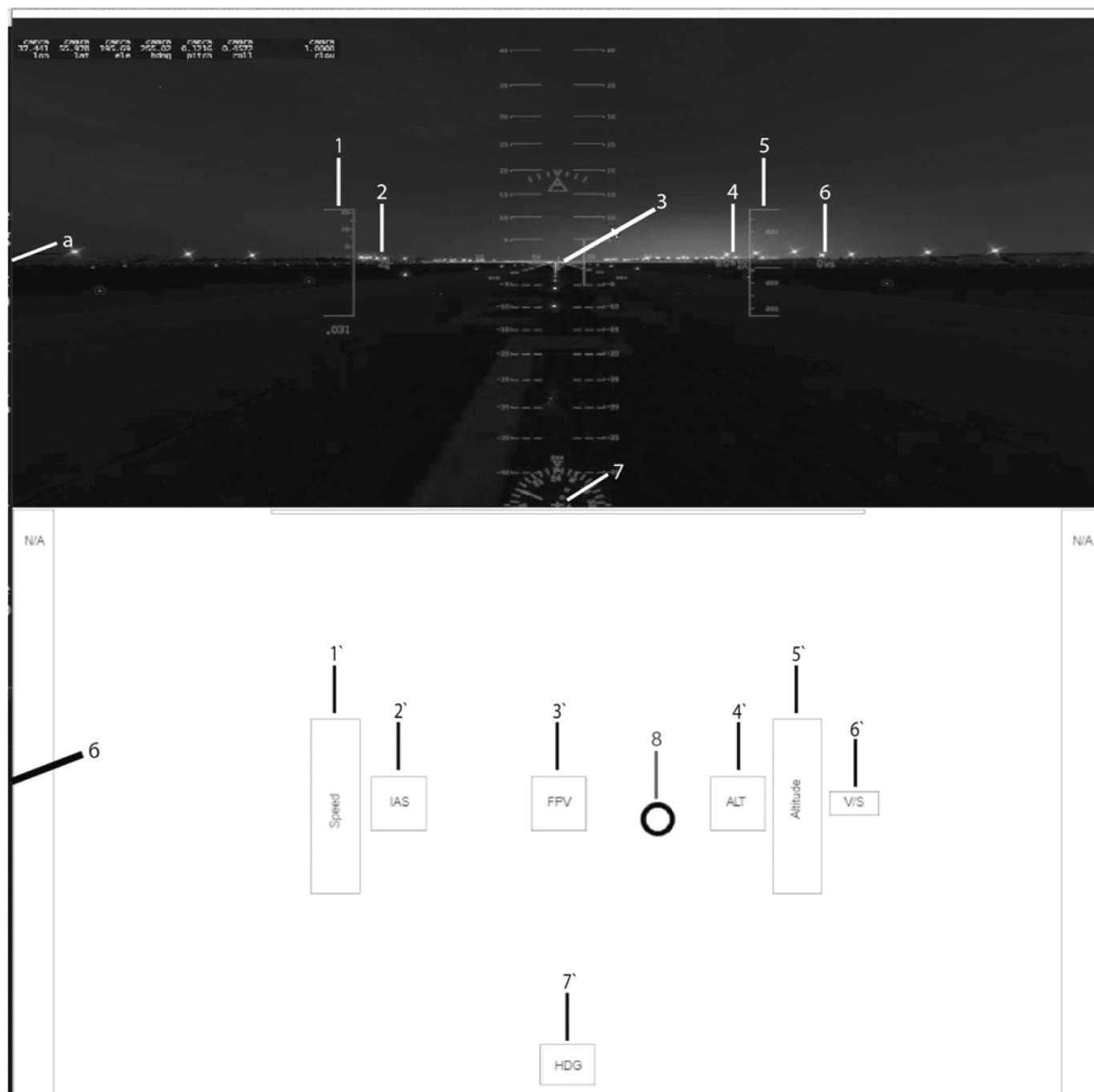


Рис. 3. Отображение исследовательской сессии в двух окнах: а — видит оператор, б — видит исследователь

На Рис. 3 блок а, отображается видеопоток авиасимулятора, поступающий со стенда. В блоке б выводится соответствующая схема индикации и текущее положение точки взгляда (8). Элементы индикации (1–7), используемой на стенде, отображаются в блоке а, им соответствуют элементы с 1' по 7' на векторном изображении индикации.

Программное обеспечение позволяет записывать получаемые данные о взгляде оператора в текстовый табличный файл. Видеопоток также транскодируется

встроенным в приложение модулем. Затем оператор может воспроизвести записанную сессию. Пример диалогового окна для просмотра записи представлен на рис. 4.

При анализе полетной сессии есть возможность кадрового просмотра записи, доступны режимы паузы и перемотки.

Таким образом, алгоритм обработки информации с *eye-tracker'a* состоит из следующих этапов:

- Получение необработанных данных от *eye-tracker'a*;



Рис. 4. Воспроизведение запись исследовательской сессии

- Приведение координат положения взгляда в нормализованный вид;
- Отправка данных по протоколу *UDP*;
- Получение и преобразование данных принимающим модулем;
- Отображение точки положения взгляда совместно с исследуемой индикацией;
- Запись полученных данных в журнал, для последующего анализа.

Интеграция технологии в стенд-прототипирования человеко-машинного интерфейса. Работа в составе стенда

Разработанные программно-аппаратные модули интегрированы в стенде-прототипирования человеко-машинного интерфейса, выполненным в виде концепта кабины сверхзвукового пассажирского самолета.

Концептуальной особенностью данной кабины является отсутствие лобового остекления и наличие в кабине одного пилота. Индикация и внекабинное пространство выводится на единый широкоформатный индикатор. Для стенда была разработана новая система индикации, позволяющая отображать всю необходимую информацию о полете на одном индикаторе.

Программная интеграция

Для программной интеграции на стенд был установлен передающий по сети *Ethernet* информацию о положении взгляда программный модуль, а также набор сводных библиотек *Ffmpeg* для передачи видеопотока.

Программное обеспечение для визуализации и анализа было установлено на независимый компьютер, находящийся в одной локальной сети со стендом.

Физическая интеграция

Датчик отслеживания положения взгляда устанавливается в нижней части СОИ, а затем подключается к компьютеру, генерирующему внекабинное пространство и индикацию, штатным кабелем типа *USB — A*,

Методика эксперимента

Для проведения эксперимента был выбран сценарий захода на посадку в аэропорту Шереметьево. Имитационная сессия была разделена три фазы (рис. 5).

Для анализа данных этап полета был разделен на следующие три под-этапа:

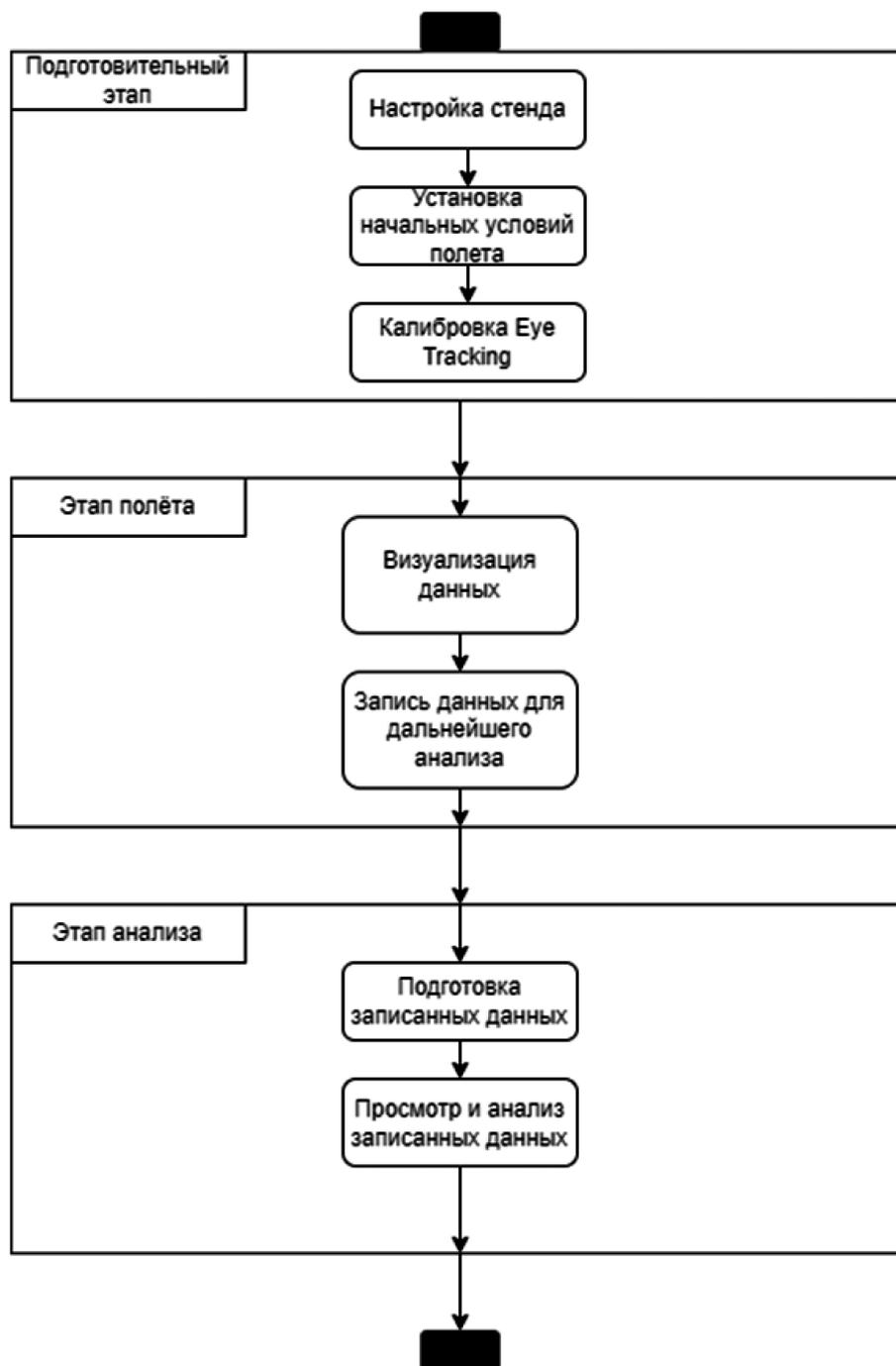


Рис. 5.

1. От высоты 2500ft до 1500ft;
2. От высоты 1500ft до 500ft;
3. От высоты 500ft до момента посадки или принятия решения об уходе на второй круг [7].

Описательный анализ результатов

На рис. 6 представлены три диаграммы на основе записанных данных. На рисунке (рис. 6 а) отображена диаграмма первого под-этапа. Рис. 6 б — второй под этап соответственно. На рис. 6 в — диаграмма для заключительно, 3 под-этапа захода на посадку.

Зонам с наиболее интенсивным цветом соответствуют те области, в которых количество фиксаций взгляда было максимально, а зонам с наименьшей интенсивностью соответствуют те области, где зафиксировано меньшее количество фиксаций взгляда. Это позволяет выявить те области, куда оператору приходится смотреть наиболее часто в течение сессии.

В зависимости от фазы полета, после стабилизации параметров, оператор постепенно переводит свое внимание на область проецирования внекабинного про-

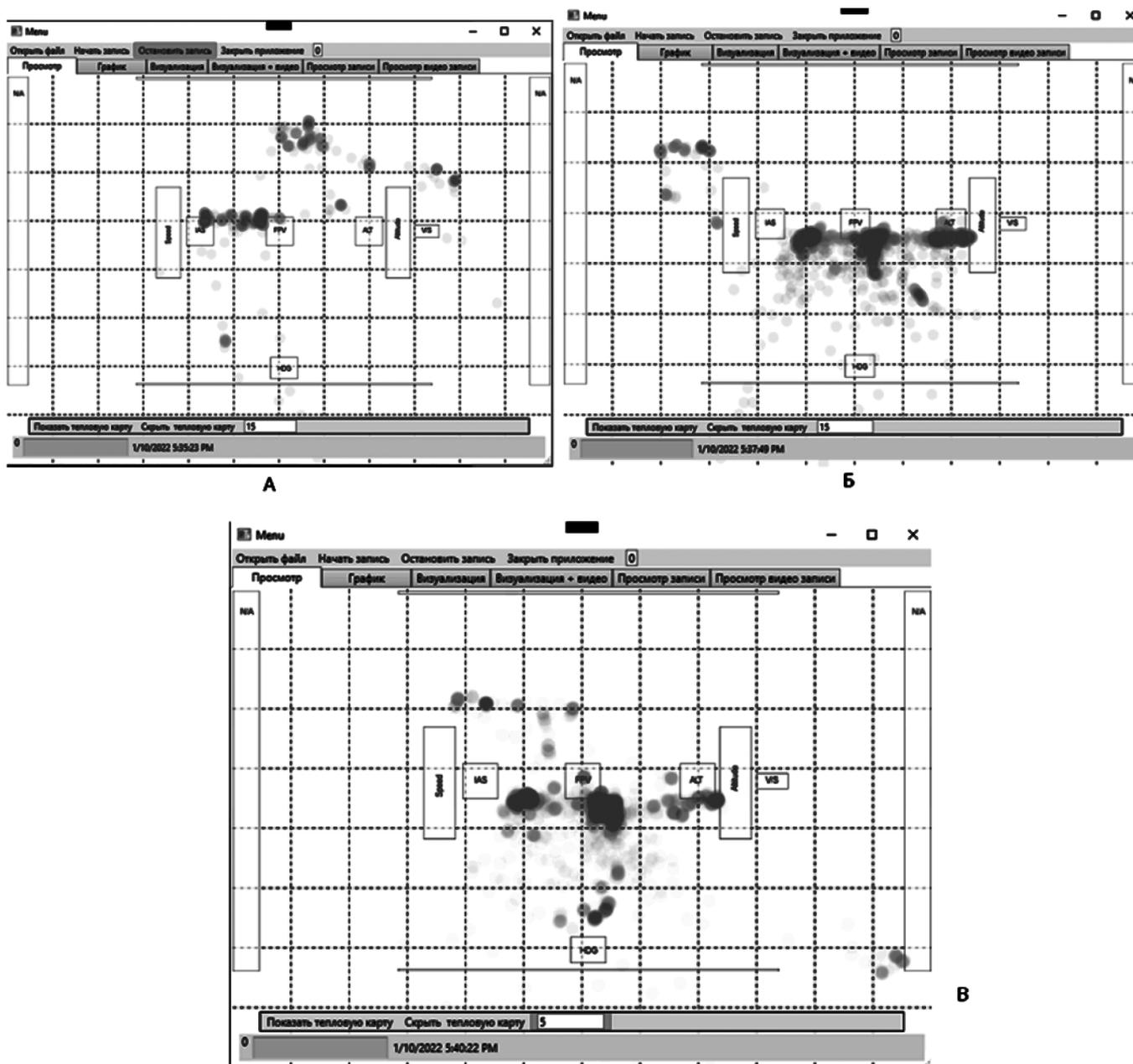


Рис. 6. Рабочие окна анализа результатов эксперимента

странства. На рис. 6 б и рис. 6 в видно, как область сосредоточения внимания оператора постепенно переходит от параметров индикации к области внекабинного пространства. При этом оператор пользуется стратегиями визуального сканирования, которые могут быть рассчитаны для каждого вида индикации [8].

Заключение

Разработанный инструмент для определения и визуализации положения точек взгляда позволяет облегчить решение задачи независимой оценки удобства отображаемой индикации, проводить дополнительную

объективную оценку качества сформированных на индикаторах символов, в том числе в условиях моделирования критических ситуаций. На стенде прототипирования выполнена проверка работоспособности системы, приведены диаграммы распределения внимания при имитации захода на посадку. Преимущество системы отслеживании взгляда заключается в легкой интеграции, а также бесконтактном взаимодействии с оператором. На основе данных, получаемых от *eye-tracker' a*, в дальнейшем возможно построение систем контроля состояния экипажа и разработка комплексных программ влияния человеческого фактора на безопасность полетов [9].

ЛИТЕРАТУРА

1. Кучерявый А.А. Авионика: Учебное пособие — 3-е изд., 2019. С. 284–285.
2. National Transportation Safety Board (NTSB). A Review of Flightcrew-Involved, Major Accidents of U.S. Carriers, 1978 through 1990, Safety Study NTSB/SS-94/01; NTSB: Washington, DC, USA, 1994.
3. Shree DV, Jeevitha; Murthy, L. R. D.; Saluja, Kamalpreet Singh; and Biswas, Pradipta (2018) "Operating Different Displays in Military Fast Jets Using Eye Gaze Tracker," Journal of Aviation Technology and Engineering: Vol. 8: Iss. 1, Article 4. URL: <https://doi.org/10.7771/2159-6670.1184>.
4. Lee, J.D. Human factors and ergonomics in automation design. In Handbook of Human Factors and Ergonomics, 3rd ed.; JohnWiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2006; С. 1570–1596.
5. Состояние безопасности полетов в гражданской авиации государств-участников соглашения о гражданской авиации и об использовании воздушного пространства в 2020 г. Межгосударственный авиационный комитет, 2021 г.
6. <https://developer.tobiiipro.com/commonconcepts/coordinatesystems.html>.
7. Maxime Reynal, Yvonne Colineaux, Andre Vernay, Frédéric Dehais. Pilot Flying vs. Pilot Monitoring during the approach phase: an eye-tracking study. International Conference on Human-Computer Interaction in Aerospace (HCI-Aero 2016), Sep 2016, Paris, France. С. 1–7.
8. Lounis C, Peysakhovich V, Causse M (2021) Visual scanning strategies in the cockpit are modulated by pilots' expertise: A flight simulator study. PLoS ONE 16(2): e0247061. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247061>.
9. Vsevolod Peysakhovich, Olivier Lefrançois, Frédéric Dehais, Mickaël Causse The Neuroergonomics of Aircraft Cockpits: The Four Stages of Eye-Tracking Integration to Enhance Flight Safety. Safety, February 2018.

© Боярский Глеб Геннадьевич (glebboyarsky@gmail.com); Черный Денис Юрьевич (mosavia.dc@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ВЛИЯНИЕ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ НА РАЗБОРЧИВОСТЬ РЕЧИ

THE EFFECT OF SOUND INSULATION OF ENCLOSING STRUCTURES ON SPEECH INTELLIGIBILITY

A. Bushmanov
A. Lozhkova

Summary. This article presents the results of a study examining the effect of sound insulation properties of enclosing structures on speech intelligibility. During the experiments, speech elements were reproduced in an acoustically muffled chamber, pretreated with filters that simulate the sound insulation of various fences when exposed to background noise of different origins. The results of the articulation tests were compared with the data obtained using modeling performed using formant and formant-modulation methods. This study allows us to quantify how sound insulation affects speech intelligibility.

Keywords: sound insulation, speech intelligibility, articulation tests, formants, noise.

Бушманов Александр Вениаминович

кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Амурский государственный университет»
bush29@mail.ru

Ложкова Анна Александровна

аспирант,
ФГБОУ ВО «Амурский государственный университет»
zabolashka@bk.ru

Аннотация. В данной статье представлены результаты исследования, изучающего влияние звукоизоляционных свойств ограждающих конструкций на разборчивость речи. В ходе экспериментов в акустически заглушенной камере были воспроизведены речевые элементы, предварительно обработанные фильтрами, имитирующими звукоизоляцию различных ограждений при воздействии фонового шума разного происхождения. Результаты проведённых артикуляционных испытаний сопоставлены с данными, полученными с помощью моделирования, выполненного с использованием формантного и формантно-модуляционного методов. Это исследование позволяет количественно оценить, насколько звукоизоляция влияет на разборчивость речи.

Ключевые слова: звукоизоляция, разборчивость речи, артикуляционные испытания, форманты, шум.

Введение

В настоящее время, в связи с возросшим интересом общества и государства к вопросам информационной безопасности, возникает необходимость в правильной оценке защищенности информации. Согласно Указу Президента Российской Федерации от 01.05.2022 N 250 «О дополнительных мерах по обеспечению информационной безопасности Российской Федерации», приоритетным направлением деятельности на ближайшее время является повышение устойчивости и безопасности функционирования информационных ресурсов и информационной безопасности в целом.

Цель данной статьи заключается в анализе влияния звукоизоляции ограждающих конструкций на разборчивость речи, что является небольшим вкладом в развитие области противодействия техническим средствам разведки. Одной из основных угроз безопасности информации ограниченного доступа является утечка информации через технические каналы. Под утечкой информации понимается неконтролируемое распространение информативного сигнала от его источника через физическую среду до технического устройства, принимающего информацию.

Перехват информации представляет собой неправомерное получение данных с использованием техниче-

ских средств, способствующих обнаружению, приему и обработке информативных сигналов. В настоящее время существует множество технических каналов утечки информации, среди которых выделяются каналы утечки речевой информации, подразделяющиеся на воздушные, параметрические, вибрационные, электроакустические и другие.

Эффективность звукоизоляции воздушного шума ограждающих конструкций измеряется в децибелах, как логарифмическое отношение интенсивности падающего звука ($I_{пад}$) к интенсивности звука, прошедшего через ограждение ($I_{пр}$):

$$R = 10 \lg \frac{I_{пад}}{I_{пр}}, \text{ дБ}, \quad (1)$$

где $I_{пад}$ — интенсивность звука падающей на ограждение волны, $I_{пр}$ — интенсивность звука, прошедшего через ограждение.

Для оценки звукоизоляции в практических целях используется индекс изоляции воздушного шума (R_w), который рассчитывается на основе известных (рассчитанных или измеренных) частотных характеристик звукоизоляции ограждающих конструкций, выраженных в децибелах. Этот индекс определяется путем сопоставления данных характеристик с эталонной частотной ха-

рактической звукоизоляции, согласно стандарту ISO 717-1 [1, с. 2].

Разборчивость речи — это показатель, описывающий способность человека воспринимать и понимать речевой сигнал. Этот параметр включает в себя такие аспекты, как слуховое восприятие, частотное распределение сигнала и способность человека догадываться о словах исходя из контекста. В отличие от звукоизоляции, которая оценивает физические параметры конструкции, разборчивость речи принимает во внимание и субъективные факторы восприятия, связанные с человеком, для которого осуществляется передача сигнала. Понимание взаимосвязи между разборчивостью речи и звукоизоляционными характеристиками ограждающих конструкций позволяет упростить процесс оценки защиты помещений от прослушивания и оптимизировать звукоизоляционные свойства перегородок с учетом особенностей восприятия [2, с. 13].

В статье представлены результаты экспериментальных исследований и математического моделирования, направленных на изучение влияния звукоизоляции различных ограждающих конструкций на разборчивость речи.

В процессе исследования были учтены следующие ключевые аспекты:

1. **Артикуляционные измерения** проводились в лаборатории при ФГБОУ ВО «Амурский государственный университет», что позволило получить более точные результаты.

2. **Диапазон частотной характеристики изоляции воздушного шума (R, дБ)** был расширен до 31,5–10 000 Гц. Показатели звукоизоляции за пределами стандартного диапазона частот были получены в соответствии с исследованиями, направленными на изучение звукоизоляции в расширенном частотном диапазоне [3, с. 21].
3. В эксперименте также были учтены различные виды шумов с разными спектральными характеристиками:
 - искусственно сгенерированный **белый шум**, **розовый шум**, естественный шум **транспортного потока**.

Эти аспекты позволили детально изучить влияние звукоизоляции на разборчивость речи в различных акустических условиях.

Артикуляционные испытания

Для оценки влияния звукоизоляции на разборчивость речи были проведены артикуляционные испытания, в которых принимали участие дикторы и слушатели. Эксперимент включал следующие ключевые этапы:

1. Диктор в лаборатории прочитал 20 артикуляционных таблиц.
2. Звуковые файлы были обработаны с помощью набора октавных фильтров, которые имитировали звукоизоляционные свойства ограждающих конструкций.
3. Респонденты прослушивали отфильтрованные сигналы на фоне устойчивого шума с уровнем

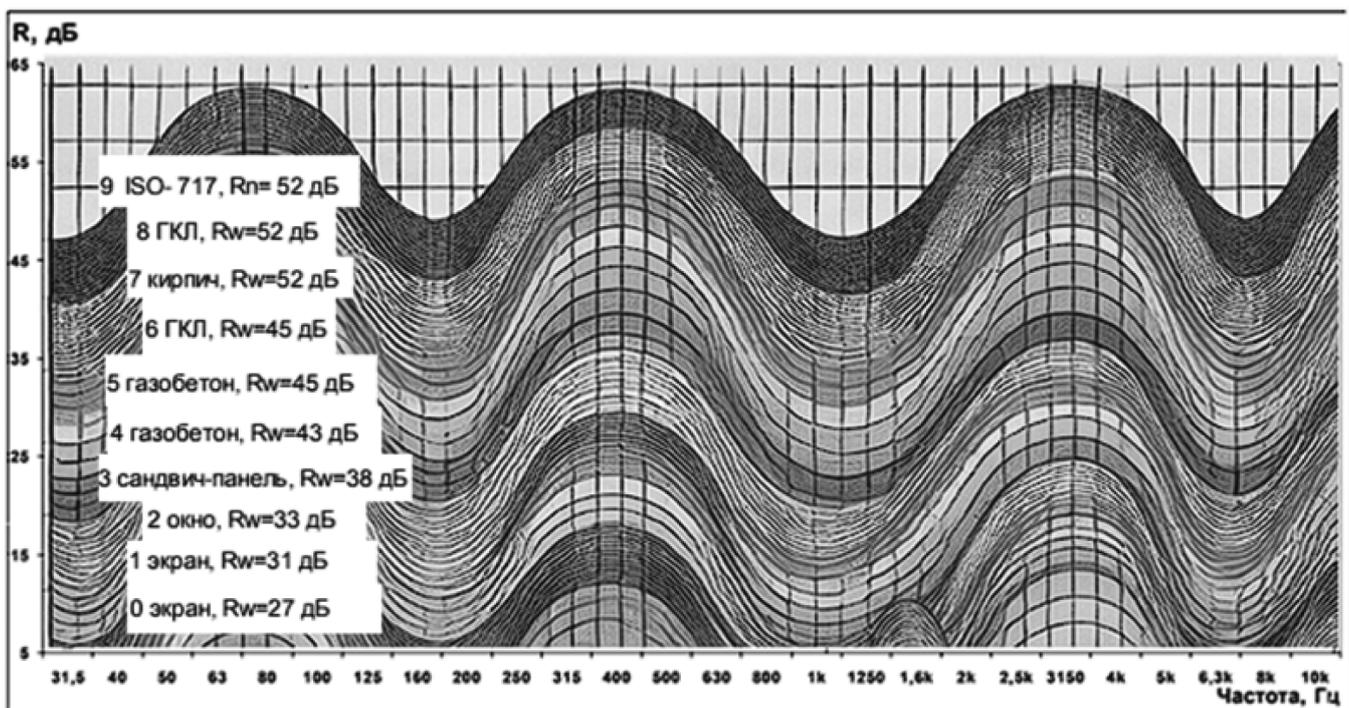


Рис. 1. Частотные характеристики звукоизоляции

30 дБА. Разборчивость речи оценивалась в соответствии с установленной процедурой, и включала воздействие различных типов шума: белого, розового и транспортного.

Для эксперимента были отобраны ограждающие конструкции с частотными характеристиками изоляции воздушного шума, индекс которых варьировался в диапазоне от 25 до 55 дБ. Частотные характеристики звукоизоляции этих конструкций представлены на рисунке 1.

Этот этап позволил проанализировать, как различные уровни звукоизоляции и виды фонового шума влияют на разборчивость речи.

Свойства ограждающих конструкций представлены в таблице 1. Звукоизоляционные характеристики ограждающих конструкций зависят от спектра шума, который воздействует на ограждение. Для учёта этого фактора вводятся специальные параметры «спектральной адаптации», которые дополняют значения индексов звукоизоляции. Шум с частотным спектром, схожим с «розовым» шумом, описывается показателем C , а шум, характерный для транспортных средств, характеризуется показателем Str [1]. Для моделирования были выбраны конструкции с одинаковым индексом изоляции воздушного шума, но различающимися по показателям спектральной адаптации [4, с. 87].

Таблица 1.

Свойства ограждающих конструкций, задействованных в испытаниях

№	Описание	Толщина, мм	Индекс изоляции воздушного шума, R_v , (C , Str), дБ
0	Панель шумопоглощающего экрана	130	27 (-1, -3)
1	Панель шумоизоляционного экрана	130	31 (-2, -5)
2	Двухкамерное стекло	70	33 (-1, -3)
3	Сэндвич-панель с облицовкой OSB	225	38 (-2, -5)
4	Монолитная газобетонная перегородка	120	43 (-1, -3)
5	Монолитная газобетонная перегородка	300	45 (-1, -3)
6	Каркасная гипсокартонная перегородка	100	38 (-3, -8)
7	Монолитная кирпичная перегородка (двухслойная)	255	52 (-2, -5)
8	Каркасная гипсокартонная перегородка	125	40 (-2, -7)
9	Оценочная характеристика в соответствии с ISO-717		52 (0, -4)

Все конструкции обладают различными индексами звукоизоляции в зависимости от их толщины и материала, что демонстрирует их способность к изоляции воздушного шума.

Компьютерное моделирование

Для оценки влияния звукоизоляции на разборчивость речи с использованием инструментальных методов и возможностей персонального компьютера был смоделирован процесс распространения звука через ограждающую конструкцию. В ходе моделирования произведён расчёт разборчивости переданного сигнала с применением формантного и формантно-модуляционного методов [5, с. 8]. Этапы моделирования представлены ниже.

1. Были загружены файлы с речевыми фрагментами, записанными в заглушённой камере в ходе проведения артикуляционных испытаний.
2. Сгенерирован модулированный сигнал, имитирующий речь, с частотным спектром, соответствующим долговременному спектру речи.
3. Загруженные и сгенерированные сигналы прошли через набор октавных фильтров, коэффициенты ослабления которых были эквивалентны показателям звукоизоляции ограждающих конструкций.
4. Оценка разборчивости речи проводилась при воздействии различных типов шума: белого шума, розового шума и шума транспортного потока. При этом шум транспортного потока моделировался с помощью коричневого шума, основываясь на данных натуральных измерений транспортных шумов.
5. Разборчивость речи была рассчитана с использованием формантного метода и формантно-модуляционного метода [6, с. 134].

Процесс оценки разборчивости речи на основе известных значений звукоизоляции представлен поэтапно:

1. **Запись речевого сигнала** — исходный речевой сигнал фиксируется.
2. **Звукоизоляция** — применяется звукоизоляция ограждающей конструкции, что влияет на прохождение звука.
3. **Генерирование шума** — создается шум (белый, розовый или транспортный), который воздействует на сигнал.
4. **Оценка парциальных отношений сигнал/шум** — оценивается соотношение уровня полезного сигнала к шуму;
5. **Оценка разборчивости речи** — производится итоговая оценка разборчивости речи в условиях звукоизоляции и шумового воздействия.

Для проведения моделирования были отобраны те же ограждающие конструкции, что использовались в артикуляционных испытаниях.

Результаты артикуляционных тестов, касающиеся разборчивости речи в зависимости от уровня звукоизоляции, представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Значение разборчивости слов, полученные путем артикуляционных испытаний

Номер ограждающей конструкции	Разборчивость слов, при действии шума транспорта	Разборчивость слов, при действии розового шума	Разборчивость слов, при действии белого шума	Индекс изоляции воздушного шума, Rw, дБ
0	0,83	0,70	0,82	26
1	0,76	0,61	0,55	30
2	0,81	0,67	0,40	32
3	0,19	0,17	0,22	37
4	0,16	0,11	0,15	42
5	0,04	0,03	0,15	44
6	0,05	0,05	0,06	44
7	0	0	0,02	51
8	0,03	0,03	0,03	51
9	0,02	0,01	0	51

Результаты математического моделирования разборчивости слов в зависимости от индекса изоляции воздушного шума и метода расчета отображены на рисунках 2–4. На графиках используются следующие обозначения:

Formant-modulated — разборчивость слов, вычисленная с помощью формантно-модуляционного метода;

Формантная разборчивость в каждой полосе:

$$A = \sum_{k=1}^N p_k \times P(E'_k), \tag{2}$$

где p_k — вероятность пребывания формант в k -том частотном диапазоне, $P(E'_k)$ — коэффициент восприятия, которая учитывает потери разборчивости из-за наличия мешающих факторов, E'_k — эффективный уровень ощущения формант [7, с. 19].

Эффективный уровень ощущения формант:

$$E_k = \overline{SNR_k}, \tag{3}$$

где SNR_k — эффективное отношение сигнал-шум.

Эффективное отношение сигнал-шум:

$$\overline{SNR_k} = \frac{1}{14} \sum_{i=1}^{14} SNR_{k,i}, \tag{4}$$

$$SNR_{k,i} = 10 \lg \frac{m_k(F_i)}{1 - m_k(F_i)}, \tag{5}$$

где $m_k(F_i)$ — коэффициент модуляции.

Коэффициент модуляции:

$$\tilde{m}_k(F_i) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi F_i T}{13.8}\right)^2}} \frac{1}{1 + 10^{-0,1((S-R)/N)}}, \tag{6}$$

где T — взаимное время реверберации двух помещений, $(S - R) / N$ — отношение сигнал-шум, с учетом звукоизоляции в дБ.

Чтобы упростить формулу (6), зависимость от частоты была опущена [9, с. 24].

Format-modulated modeling — разборчивость слов, рассчитанная с использованием формантно-модуляционного метода;

Formant modeling — разборчивость слов, определенная на основе формантного моделирования;

Articulated — разборчивость слов, полученная в ходе артикуляционных испытаний (таблица 2).

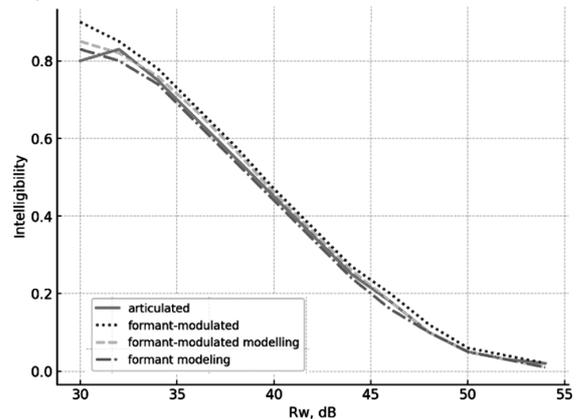


Рис. 2. Разборчивость слов в зависимости от звукоизоляции при воздействии шума транспорта

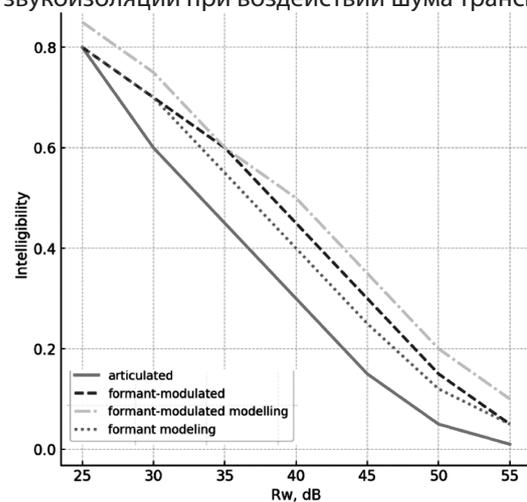


Рис. 3. Разборчивость слов в зависимости от звукоизоляции при воздействии белого шума

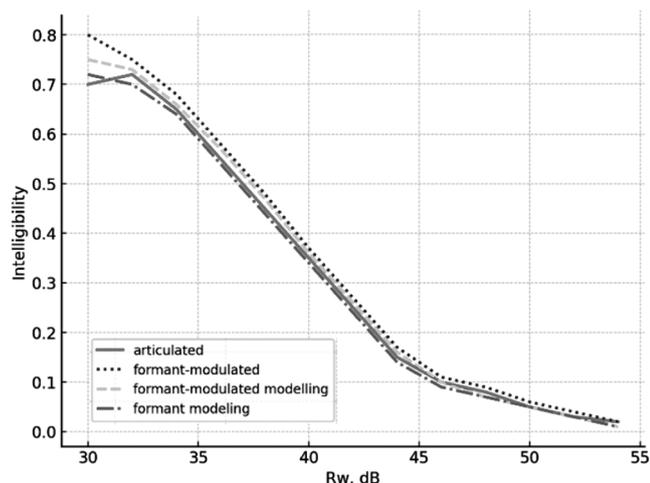


Рис. 4. Разборчивость слов в зависимости от звукоизоляции при воздействии розового шума

Как видно из графиков на рисунках 2–4, при воздействии белого шума зависимость разборчивости речи от звукоизоляции имеет наиболее линейный характер. Расчет разборчивости слов при белом шуме также демонстрирует наибольшую погрешность для значений индекса звукоизоляции от 32 до 40 дБ, в то время как для звукоизоляции от 45 дБ наблюдается наименьшая погрешность [10, с. 41]. При воздействии розового шума и шума транспортного потока результаты оценки разборчивости речи для низких значений звукоизоляции

оказались завышенными, что следует учитывать при применении указанных методов [8, с. 15].

Характер зависимости разборчивости речи, полученной в ходе артикуляционных испытаний, совпадает с характером разборчивости, определенной с использованием методов моделирования.

Заключение

- приведены расчеты разборчивости речи в зависимости от звукоизоляционных свойств ограждающих конструкций с использованием различных методов. Подчеркнуто, что наибольшее соответствие экспериментальным данным демонстрирует методика, основанная на расчете коэффициента модуляции;
- обнаружено, что при воздействии шума транспортного потока наблюдается наиболее нелинейная зависимость разборчивости речи от звукоизоляции;
- характер зависимости разборчивости речи от звукоизоляции совпадает как для результатов, полученных методом артикуляционных испытаний, так и для результатов, полученных с помощью моделирования. Для оценки разборчивости речи в зависимости от звукоизоляции рекомендуется использовать представленные выше методики.

ЛИТЕРАТУРА

1. ISO 717-1:1996 Acoustics — Rating of sound insulation in buildings and of building elements — Part 1: Airborne sound insulation, Switzerland, 1996.
2. Покровский Н.Б. Расчет и измерение разборчивости речи. — М.: Связьиздат, 1962. 392 с.
3. Цвикер Э., Фельдкеллер Р. Ухо как приемник информации. Перевод с немецкого под редакцией Б.Г. Белкина. — М., «Связь», 1971. 255 с.
4. Park H.K., Bradley J.S. and Gover B.N. Evaluation of Airborne Sound Insulation in Terms of Speech Intelligibility // IRC Research Report, IRC RR-228, 2007.
5. ГОСТ 25902–83. «Зрительные залы. Методы определения разборчивости речи».
6. Трушин В.А. Экспериментальная оценка разборчивости речи в задачах защиты информации на основе модифицированных артикуляционных испытаний / В.А. Трушин, И.Л. Рева, А.В. Иванов // Актуальные проблемы электронного приборостроения: матер. X Междунар. конф. — Новосибирск, 2010. — Т. 3. — С. 133–135.
7. МИ 2083–90. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей. — М.: Издательство стандартов, 1991. — 17 с.
8. ГОСТ Р 50840–95 Передача речи по трактам связи. Методы оценки качества, разборчивости и узнаваемости. — М.: Госстандарт России, 1995. — 230 с.
9. Рева И.Л. Организация эксперимента по оценке разборчивости речи со связными текстами. [Текст] / И.Л. Рева // Сборник научных трудов НГТУ №4(62) 2010.
10. Железняк В.К., Макаров Ю.К., Хорев А.А. Некоторые методические подходы к оценке эффективности защиты речевой информации // Специальная техника. — 2000. — № 4. — С. 39–45.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСНОГО ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ДАЛЬНОМ ГРАНИЧНОМ СЛОЕ ГЕТЕРОГЕННОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ

Ветошкин Никита Владимирович

Аспирант, Российская академия народного хозяйства
и государственной службы
nikita@vetoshkin.info

MODELING THE APPLICATION OF COMPLEX ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE FAR EDGE LAYER OF A HETEROGENEOUS DISTRIBUTED SYSTEM

N. Vetoshkin

Summary. The development of artificial intelligence is taking place at a high pace on devices with large computing resources, which are constantly increasing data storage volumes and improving performance. However, attention to devices on the periphery seems to be low due to the lack of computing resources. But such devices also have an important advantage — a large physical quantity, which can be used in building distributed systems with artificial intelligence. In this regard, this article is aimed at identifying the possibilities of using peripheral devices in complex, including distributed information systems. Three approaches to such systems are analyzed and described: with and without peripherals, and an integrated approach when peripherals form an auxiliary role for a complex system. This approach involves the introduction of machine learning models into the control device and the collection device. For the approach, the situation of application in an unmanned vehicle will be simulated, where road signs are the object of detection. An experiment was conducted for the simulated situation, the results of which confirm the expediency of using an integrated approach for a system with artificial intelligence. Based on the results, the main advantages, and disadvantages of implementing an integrated approach using peripheral devices in complex systems are highlighted. This work will be useful for researchers in the field of the Internet of Things, artificial intelligence, as well as specialists in the development of unmanned vehicles.

Keywords: Edge Computing, Edge AI, TinyML, distributed systems, Tiny AI, self-driving cars, MEC.

Аннотация. Развитие искусственного интеллекта происходит высокими темпами на устройствах с большими вычислительными ресурсами, у которых постоянно увеличивается объем хранения данных и повышается производительность. Однако, внимание к устройствам на периферии представляется низким, ввиду недостатка вычислительных ресурсов. Такие устройства обладают важным преимуществом — большим физическим количеством, что может быть использовано при построении распределенных систем с искусственным интеллектом. В связи с этим, данная статья направлена на выявление возможностей применения периферийных устройств в сложных, в том числе распределенных информационных системах. Проанализированы и описаны три подхода к таким системам: с периферийными устройствами, без них и комплексный подход, когда периферийные устройства формируют вспомогательную роль для сложной системы. Данный подход предполагает внедрение моделей машинного обучения в устройство управления и устройства сбора. Для подхода будет смоделирована ситуация применения в беспилотном транспортном средстве, где объектом детекции выступают дорожные знаки. Для моделируемой ситуации проведен эксперимент, результаты которого подтверждают целесообразность использования комплексного подхода для системы с искусственным интеллектом. По результатам выделены основные преимущества и недостатки внедрения комплексного подхода с использованием периферийных устройств в сложные системы. Данная работа будет полезна исследователям в области интернета вещей, искусственного интеллекта, а также специалистам по разработке беспилотных машин.

Ключевые слова: граничные вычисления, граничный искусственный интеллект, TinyML, распределенные системы, TinyAI, беспилотные транспортные средства, MEC.

Введение

С развитием технологий и увеличением количества разнообразных устройств с микроконтроллерами, растет и их вычислительная мощность. Современные микроконтроллеры обладают высокой производительностью и низким энергопотреблением, что делает их привлекательными для использования в различных сферах [6].

Однако, в отрасли информационных технологий наблюдается переход от облачных вычислений к граничным вычислениям [1][2]. Это связано с несколькими

ключевыми причинами. Во-первых, с ростом числа устройств, подключенных к сети интернет, увеличивается нагрузка на сетевую инфраструктуру. Во-вторых, вопросы безопасности данных и государственное регулирование требуют хранения конфиденциальной информации на собственной инфраструктуре. В-третьих, в некоторых сферах, таких как сельское хозяйство, добыча полезных ископаемых и энергетика, требуется высокая отказоустойчивость и автономность работы граничной системы. Наконец, сокращение эксплуатационных расходов на поддержание систем становится все более актуальным [4][9].

Материалы и методы

В связи с этим, архитектура распределенных систем претерпевает изменения. Она включает в себя три основных слоя: облачный слой, ближний граничный слой и дальний граничный слой [3][11]. Ближний граничный слой содержит сетевую инфраструктуру и телекоммуникационное оборудование, а дальний граничный слой — устройства, применяемые в рамках граничных вычислений. Для последнего слоя разрабатываются концепции архитектур, такие как туманные вычисления, Multi-Access Edge Computing (MEC) и Cloudlet [5][7][10].

Устройства в дальнем граничном слое можно разделить на три группы: высокопроизводительные устройства (сервера, кластеры, графические ускорители), устройства с микроконтроллерами и устройства с микропроцессорами. Задача устройств с микроконтроллерами — сбор данных, а устройств с микропроцессорами — обработка и сведение данных. Последние обладают достаточной производительностью для работы с моделями искусственного интеллекта [8].

В данной работе будет проведен анализ применения комплексного искусственного интеллекта в рамках дальнего граничного слоя. Будет воссоздан подход по созданию нового разделения вычислительных ресурсов для граничных вычислений, где предобработка данных осуществляется на устройствах с микроконтроллером, а результаты передаются на устройства с микропроцессором. Осуществлен эксперимент, где модель машинного обучения будет запущена на устройстве с микропроцессором и на устройствах с микроконтроллером. По результатам будут сформированы выводы о возможной эффективности переноса легковесных моделей машинного обучения на устройства с микроконтроллерами.

Выделяют 3 основных слоя распределенных систем с применением граничных вычислений: облачный слой, ближний граничный слой, дальний граничный слой [1][3]. Пример такого разделения на слои и категории устройств, которые используются в этих слоях представлен на рисунке 1.

Понятие Far Edge (дальний граничный слой) было впервые описано Китом Бэзиллом в 2021 году [11]. Дальний граничный слой определяется как сетевое и инфраструктурное пространство, которое эксплуатируется и принадлежит организациям, являющимся конечным пользователем системы. Слой имеет множество секторов применения: коммерция, промышленность, государство. Количество устройств в таком слое может достигать десятки тысяч. Основной функцией слоя является агрегация и анализ данных [4][9].

В данной статье рассматриваются системы имеющие в составе 2 группы устройств: устройства с микропроцессором (микрокомпьютеры, SoC) и устройства с микроконтроллером [6][8].

Размещение моделей машинного обучения на одноплатных компьютерах (SoC) на базе Linux не является сложным процессом в виду единого интерфейсного входа — ядра Linux. Доступные сегодня 32-разрядные микроконтроллеры имеют гораздо меньшую стоимость по сравнению с микрокомпьютерами, и для их работы требуется всего несколько милливатт, что делает их энергоэффективной и экономичной альтернативой [12]. Однако такие устройства имеют строгие ограничения ресурсов и содержат встроенные операционные системы реального времени не на базе Linux и множество

Облачный слой	Ближний граничный слой	Дальний граничный слой	
Публичное облако	Вышки сотовой связи	Серверы, кластеры, графические ускорители	Периферийные устройства Простые датчики с МК* "Умные" датчики с МК* Поточковые устройства с МК*
Частное облако	Инфраструктура оператора WAN		
Гибридное облако	LTE сети		
	SDWAN	Микрокомпьютеры (SoC)	

*МК-микроконтроллер

Рис. 1. Компоненты распределенных систем с применением граничных вычислений

других подобных ограничений, что порождает разнородность внедрения легковесных моделей искусственного интеллекта [13].

Моделирование ситуации в гетерогенной распределенной системе

Для проведения эксперимента требуется моделирование потенциального сценария использования комплексного искусственного интеллекта в рамках дальнего граничного слоя. В качестве системы на границе был выбран беспилотный наземный транспорт [14].

Выбор беспилотного транспорта обоснован тем, что на граничный микрокомпьютер (SoC) поступает большое количество потоков данных с датчиков для последующей обработки и принятия решений. Частота передачи экземпляров данных в потоках является высокой. Датчики представляют из себя различные устройства сбора, в том числе под управлением микроконтроллера [15][16].

В моделируемой ситуации в качестве устройства управления выступает граничный микрокомпьютер, а устройствами для сбора данных — набор камер под управлением микроконтроллеров на транспортном средстве [17].

В качестве объекта детекции выступает набор дорожных знаков.

Можно выделить три потенциальных варианта использования искусственного интеллекта для обнаружения дорожных знаков на изображении в беспилотном транспортном средстве.

Первый подход предполагает устройство управления с искусственным интеллектом, которое находится на удаленном сервере — в облаке. Реализация имеет существенный недостаток — нестабильность работы с сетью ввиду разнородности географического применения системы [18].

Второй подход является граничным решением, где искусственный интеллект запускается на микрокомпьютере SoC (System-on-Chip). С устройств сбора на микрокомпьютер поступает видеопоток данных. Таких потоков может быть несколько и их количество зависит от набора устройств в рассматриваемой системе [19].

Третий подход является моделируемым. Искусственный интеллект запускается на микрокомпьютере и микроконтроллерах. Обработка видеопотока осуществляется на устройствах сбора данных. Микроконтроллер является актуатором сценариев последующей обработки для устройств управления на базе микропроцессоров.

Применяя теорию систем для второго подхода, устройством управления служит микрокомпьютер SoC,

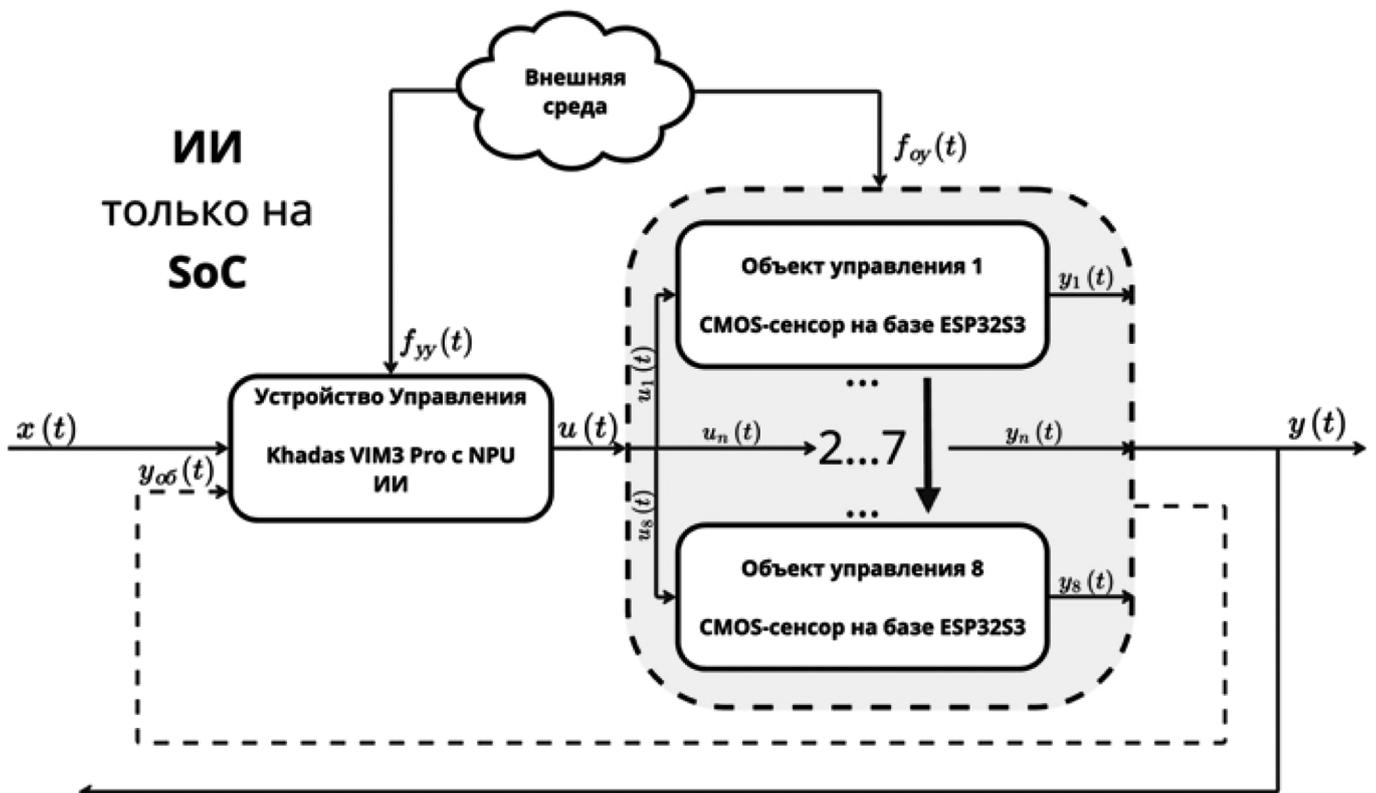


Рис. 2. Схема концепции архитектуры системы с одним уровнем устройств управления

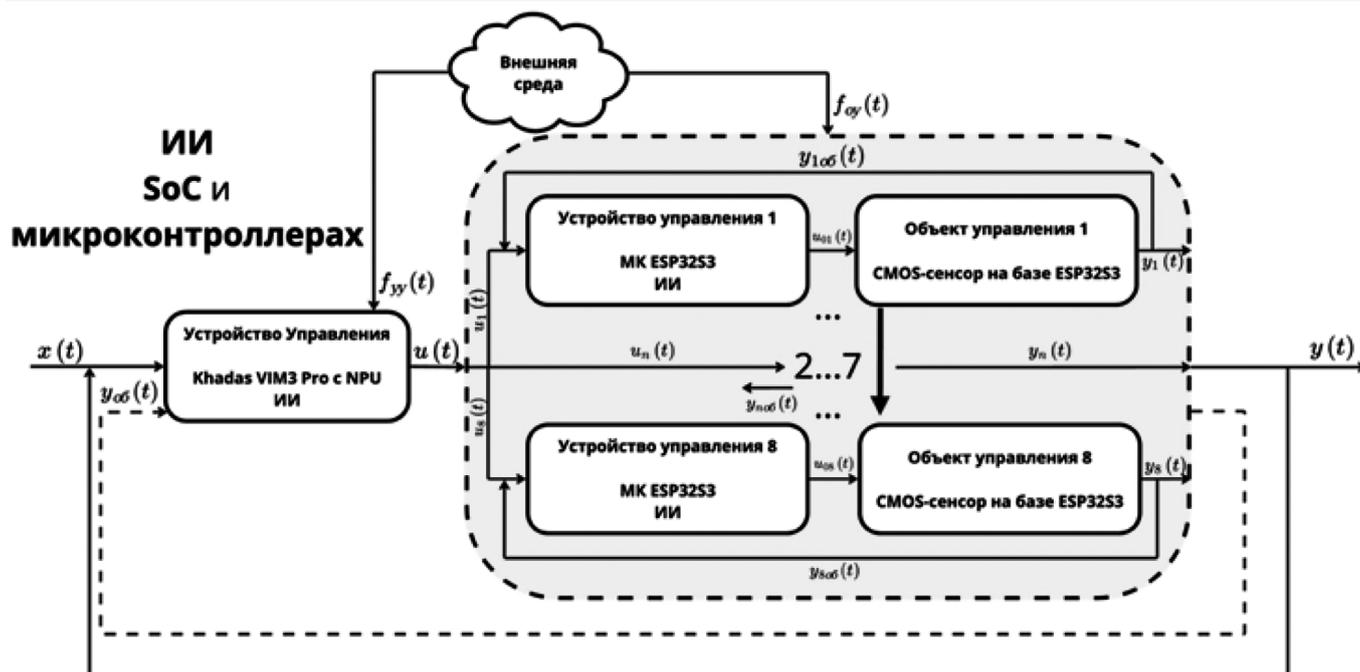


Рис. 3. Схема концепции архитектуры с двумя уровнями устройств управления

объектом управления — набор камер. Схема реализации представлена на рисунке 2.

Моделируемое решение содержит устройство общего управления — микрокомпьютер SoC, дополнительные устройства управления в виде микроконтроллеров, взаимодействующих с CMOS сенсором. Схема моделируемого решения представлена на рисунке 3.

Оборудование и материалы для проведения эксперимента

Оборудование для проведения эксперимента:

SoC Khadas VIM3 Pro с нейропроцессиновыми ядрами (NPU), ключевые технические характеристики представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Основные технические характеристики микрокомпьютера Khadas VIM3 Pro

Показатель	Характеристика
SoC	Amlogic A311D
CPU	4× ARM Cortex-A73 @ 2.2 ГГц 2× ARM Cortex-A53 @ 1.8 ГГц
GPU	ARM Mali-G52 MP4 @ 800 МГц
RAM	4 Гб LPDDR4
NPU	5 TOPS (количество операций в секунду в триллионах)

Устройства сбора с микроконтроллером ESP32S3 в количестве 8 штук. Технические характеристики представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Основные технические характеристики отладочной платы с микроконтроллером ESP32S3

Показатель	Характеристика
CPU	2× 32-bit LX7 @ 240МГц
ROM	384 Кб
SRAM	512 Кб
PSRAM	8 Мб
FLASH	16 Мб

На рисунке 4, сверху — микрокомпьютер Khadas VIM3 Pro, снизу — 8 отладочных плат с микроконтроллером ESP32S3.

Для проведения эксперимента была использована предобученная модель tensorflow lite, задачей которой является определение дорожных знаков на изображении размерностью 48x48 пикселей в градациях серого. Над моделью предварительно был проведен процесс квантования, входной и выходной тензор является целочисленным.

На вход модели поступает тензор, размерностью (1x48x48x1), на выходе массив с 4 классами дорожных знаков: только поворот налево, запрет обгона, только поворот направо, стоп.

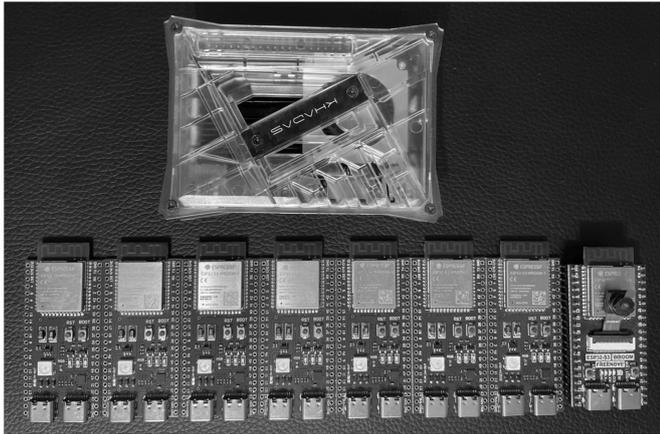


Рис. 4. Состав оборудования для проведения эксперимента

Тестовый набор содержит 1011 изображений, содержащих дорожные знаки. Примеры таких изображений представлены на рисунке 5.

Результаты

Для архитектуры без управляющих устройств с микроконтроллером, было проведено 10 итераций работы модели. Модель запускалась на микрокомпьютере (KHADAS VIM3 Pro) с применением ядер NPU. На рисунке 6 представлена зависимость количества обработанных изображений от накопленной суммы времени работы по обработке изображений искусственным интеллектом. Время, учитываемое в накопленной сумме,

характеризует разницу между вводом входного тензора и получением выходного тензора с результатами. В эксперименте не учитывается время на передачу, предобработку и постобработку данных.

Ключевые результаты 10 итераций представлены в таблице 3.

Для архитектуры, содержащей управляющие устройства с микроконтроллером, было проведено несколько итераций с различным количеством устройств сбора. Модель была загружена в микроконтроллеры ESP32S3. Для аппаратного ускорения работы модели использовалась специализированная библиотека ESPNN. Результаты итераций представлены на рисунке 7 и в таблице 4.

На рисунке 8 прослеживается тренд уменьшения времени по гиперболическому закону. С увеличением числа используемых устройств сбора время выполнения уменьшается, вплоть до времени выполнения обработки одного изображения на SoC.

Таким образом, при подключении большого количества устройств сбора, целесообразно переносить работу модели искусственного интеллекта непосредственно на устройство управления с микроконтроллером. Дополнительно, можно сделать вывод о том, что на устройстве управления с микроконтроллером рекомендуется выносить легкие нейросети с задачей генерации событий-актуаторов для всей системы, в случае обнаружения необходимых данных.

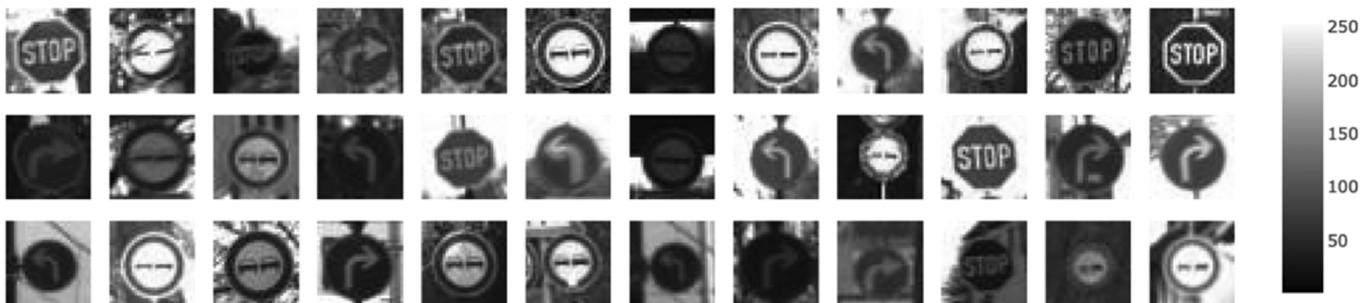


Рис. 5. Примеры изображений, содержащих дорожные знаки из тестового набора

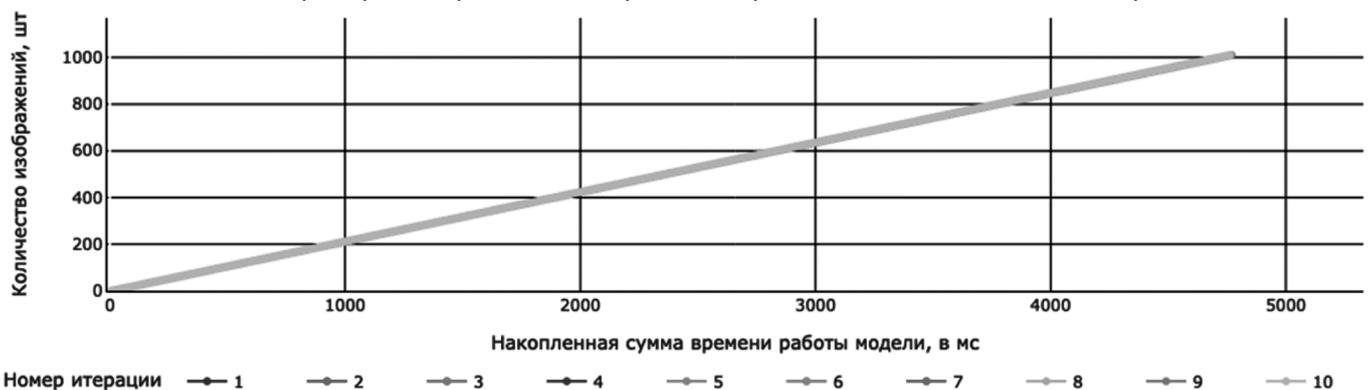


Рис. 6. График накопленного времени по обработке моделью изображений на Khadas VIM3 Pro

Таблица 3.

Результаты работы модели на микрокомпьютере Khadas VIM3 Pro

№ итерации	Минимальное время обработки в мс	Медианное время обработки в мс	Среднее время обработки в мс	Максимальное время обработки в мс	Время обработки всего тестового набора в мс
1	4.684905	4.70653	4.712795179	5.034448	4764.635926
2	4.688238	4.707446	4.7143036508	5.060865	4766.160991
3	4.681071	4.708613	4.7168851444	5.107491	4768.770881
4	4.683697	4.706363	5.3198838991	616.58282	5378.4026219
5	4.68353	4.707405	4.7145564015	5.027282	4766.416522
6	4.687072	4.708405	4.7158674758	5.024115	4767.742018
7	4.684988	4.703363	4.709582453	5.124449	4761.38786
8	4.676321	4.704696	4.71099111276	5.056657	4762.812015
9	4.685071	4.706405	4.7120031691	4.834697	4763.835204
10	4.676905	4.705571	4.7120400553	5.160991	4763.872496

Таблица 4.

Результаты работы модели в распределённой системе с ESP32S3.

Количество узлов распределённой системы	Минимальное время обработки в мс	Медианное время обработки в мс	Среднее время обработки в мс	Максимальное время обработки в мс	Время обработки всего тестового набора в мс
1	90.422	92.671	92.602874382	95.305	93621.506
2	90.5935	92.08525	93.679438735	223.4685	47401.796
4	90.6055	91.072	92.182599802	109.64075	23322.19775
6	90.6227	91.424	93.906321499	137.0092	15870.1683
8	90.68275	91.175	93.690965879	109.264875	11898.7527

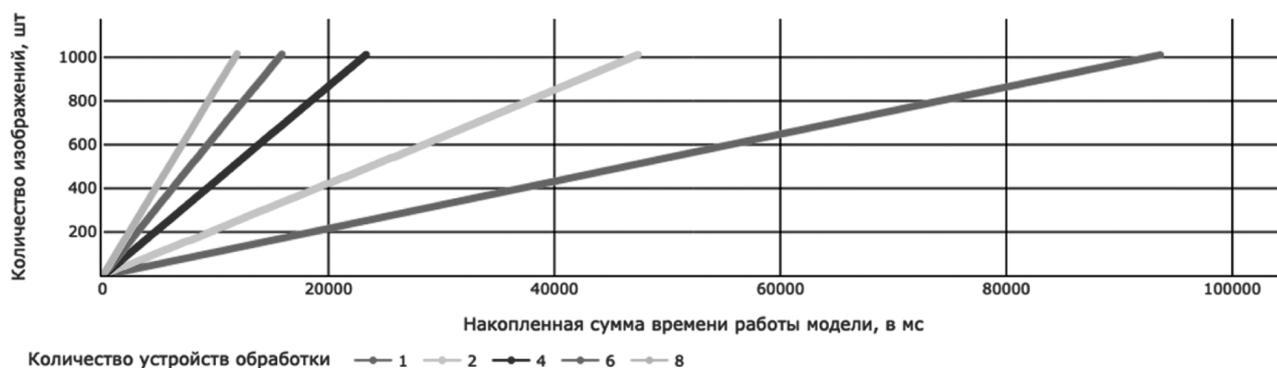


Рис. 7. График накопленного времени по обработке моделью изображений в зависимости от количества подключенных ESP32S3 к распределенной системе

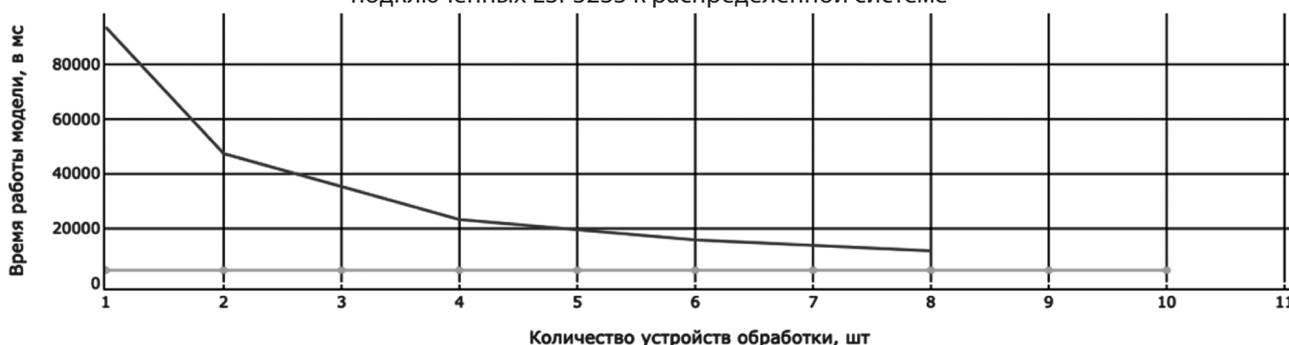


Рис. 8. График накопленного времени по обработке моделью изображений в зависимости от количества подключенных ESP32S3 к распределенной системе и ограничение с обработкой только на микрокомпьютере SoC

В результате эксперимента можно выделить следующие преимущества такого подхода:

1. Устройство управления с микроконтроллером имеет функцию актуатора для событий последующей обработки на устройстве сбора — микрокомпьютере. Таким образом, линии связи для обмена данными между устройствами менее загружены.
2. Снижение общего энергопотребления системы. В рамках работы системы снижается нагрузка на микрокомпьютер (SoC). В результате чего снижается энергопотребление всей системы.

Заключение

В этой статье была представлена система применения комплексного искусственного интеллекта относительно дальнего граничного слоя распределенной системы. Внедрение искусственного интеллекта в микрокомпьютеры и микроконтроллеры в рамках такой системы позволяет:

1. Перераспределить вычислительную нагрузку системы и обеспечить ее снижение на основное устройство управления.
2. Снизить энергопотребление всей системы
3. Использовать ресурсы устройства управления по требованию. При обнаружении устройством сбора с искусственным интеллектом необходимых данных, генерируется событие для активации ресурсов общего устройства управления.
4. Снизить поток данных межмашинного взаимодействия в рамках системы. Снижается нагрузка на каналы связи между устройствами, ввиду снижения частоты обмена данными

Недостатком использования такой системы служит разнородность устройств сбора и их архитектур. Не существует единого интерфейса для работы моделей машинного обучения на различных типах микроконтроллеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Shi W., Cao J., Zhang Q., Li Y., Xu L. Edge Computing: Vision and Challenges // IEEE Internet of Things Journal. 2016. Vol. 3, № 5. P. 637–646.
2. Satyanarayanan M. The Emergence of Edge Computing // Computer. 2017. Vol. 50, № 1. P. 30–39.
3. Bonomi F., Milito R., Zhu J., Addepalli S. Fog Computing, and Its Role on the Internet of Things // Proceedings of the First Edition of the MCC Workshop on Mobile Cloud Computing. 2012. P. 13–16.
4. Mao Y., You C., Zhang J., Huang K., Letaief K.B. A Survey on Mobile Edge Computing: The Communication Perspective // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2017. Vol. 19, № 4. P. 2322–2358.
5. Taleb T., Samdanis K., Mada B., Flinck H., Dutta S., Sabella D. On Multi-Access Edge Computing: A Survey of the Emerging 5G Network Edge Cloud Architecture and Orchestration // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2017. Vol. 19, № 3. P. 1657–1681.
6. Lin J., Yu W., Zhang N., Yang X., Zhang H., Zhao W. A Survey on Internet of Things: Architecture, Enabling Technologies, Security and Privacy, and Applications // IEEE Internet of Things Journal. 2017. Vol. 4, № 5. P. 1125–1142.
7. Dastjerdi A.V., Buyya R. Fog Computing: Helping the Internet of Things Realize Its Potential // Computer. 2016. Vol. 49, № 8. P. 112–116.
8. Chen X., Jiao L., Li W., Fu X. Efficient Multi-User Computation Offloading for Mobile-Edge Cloud Computing // IEEE/ACM Transactions on Networking. 2016. Vol. 24, № 5. P. 2795–2808.
9. Wang S., Zhang X., Zhang Y., Wang L., Yang J., Wang W. A Survey on Mobile Edge Networks: Convergence of Computing, Caching and Communications // IEEE Access. 2017. Vol. 5. P. 6757–6779.
10. Chiang M., Zhang T. Fog and IoT: An Overview of Research Opportunities // IEEE Internet of Things Journal. 2016. Vol. 3, № 6. P. 854–864.
11. Basil K. Near, Far or Tiny: Defining and Managing Edge Computing in a Cloud Native World. VMBlog, 27 Apr. 2021, <https://vmblog.com/archive/2021/04/27/near-far-or-tiny-defining-and-managing-edge-computing-in-a-cloud-native-world.aspx>
12. Banbury C.R., Reddi V.J., Lam M., et al. Benchmarking TinyML Systems: Challenges and Direction // arXiv preprint arXiv:2003.04821. 2020.
13. David R., Duke J., Jain A., et al. TensorFlow Lite Micro: Embedded Machine learning on TinyML Systems // arXiv preprint arXiv:2010.08678. 2020.
14. Grigorescu S., Trasnea B., Cocias T., Macesanu G. A survey of deep learning techniques for autonomous driving // Journal of Field Robotics. 2020. Vol. 37, № 3. P. 362–386.
15. Zhu L., Yu F.R., Wang Y., Ning B., Tang T. Big Data Analytics in Intelligent Transportation Systems: A Survey // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2019. Vol. 20, № 1. P. 383–398.
16. Mahmud R., Koch F.L., Buyya R. Cloud-Fog Interoperability in IoT-enabled Healthcare Solutions // Proceedings of the 19th International Conference on Distributed Computing and Networking. 2018. P. 1–10.
17. Teichmann M., Weber M., Zöllner M., Cipolla R., Urtasun R. MultiNet: Real-time Joint Semantic Reasoning for Autonomous Driving // 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). 2018. P. 1013–1020.
18. Zhang W., Zhang Z., Chao H.-C. Cooperative Fog Computing for Dealing with Big Data on the Internet of Vehicles: Architecture and Hierarchical Resource Management // IEEE Communications Magazine. 2017. Vol. 55, № 12. P. 60–67.
19. Kang Y., Hauswald J., Gao C., et al. Neurosurgeon: Collaborative Intelligence Between the Cloud and Mobile Edge // Proceedings of the Twenty-Second International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems. 2017. P. 615–629.

© Ветошкин Никита Владимирович (nikita@vetoshkin.info)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2024.11.07

СИНТЕЗИРОВАНИЕ ВИДЕО С ПОМОЩЬЮ ВАРИАЦИОННОГО АВТОЭНКОДЕРА И ГЕНЕРАТИВНО-СОСТЯЗАТЕЛЬНОЙ МОДЕЛИ

GENERATION OF SYNTHETIC VIDEOS ACCORDING TO THE NECESSARY PARAMETERS

R. Vysotsky
V. Demichev

Summary. The basic principles of operation of generative neural networks are considered using the example of developing a project for frame-by-frame video generation based on the first frame and a video sample. Using a variational autoencoder, the image is transformed into a feature space, and then a decoder is used to assemble a new image based on the sample. Additional use of a generative adversarial network allows for a significant improvement in the quality of the images created.

Keywords: neural networks, generation, video, autoencoder, discriminator.

Высоцкий Роман Николаевич

Еврейский университет, г. Москва
roman0810.r@gmail.com

Демичев Василий Анатольевич

Доцент, Псковский государственный университет;
Еврейский университет, г. Москва
vademichev@gmail.com

Аннотация. Рассматриваются основные принципы работы генеративных нейронных сетей на примере разработки проекта по кадровой генерации видео на основе первого кадра и видео-образца. С помощью применения вариационного автоэнкодера осуществляется преобразование изображения в пространство признаков, а затем с помощью декодера производится сборка нового изображения по образцу. Дополнительное применение генеративно-сопоставительной сети позволяет значительно повысить качество создаваемых изображений.

Ключевые слова: нейронные сети, генерация, видео, автоэнкодер, дискриминатор.

Введение

Быстрое развитие сферы искусственного интеллекта и машинного обучения повлекло за собой появления множества сервисов по генерации различного рода контента, в том числе — синтетических видео, в которых, например, возможно заменить актера в фильме на другого человека, при этом он будет выполнять те же действия.

Некоторые такие сервисы, например Creative Reality Studio [1] имеют довольно хорошее качество работы. Большой интерес представляет методика генерации таких видео, но как правило подробности их работы в открытых источниках не раскрываются.

Настоящая работа представляет собой практическое исследование принципов создания генеративных сетей для синтеза видео, тонких моментов их настройки и обучения.

Мы рассмотрим преимущества и недостатки вариационного автоэнкодера (VAE), его устройство, а также объединим эту модель с генеративно-сопоставительной (GAN) для сведения к минимуму этих недостатков.

Демонстрируются полученные практические результаты.

Вариационный автоэнкодер

Вариационный автоэнкодер применим для работы со многими типами данных, и не ограничивается изобра-

жениями, однако так как мы собираемся применять его только для обработки последних, все следующие примеры и решения будут касаться только изображений.

Принцип работы вариационного автоэнкодера заключается в том, что каждое изображение может быть сжато в определенную точку на пространстве признаков изображений и восстановлено из такой точки при необходимости. Причем размерность данного пространства должна быть намного меньше, чем количество признаков, которыми описано исходное изображение в виде описания цветов каждого отдельного пикселя. Таким образом, при сильном сжатии данных, описывающих картинку, остаются только ее важнейшие признаки, которые намного проще обрабатывать. Нечто подобное происходит, когда человек вспоминает увиденную картинку: в памяти откладывается не точная копия увиденного, а набор замеченных паттернов. Так, например, увидев красивую машину на дороге, потом легко вспомнить какого она была цвета, но невозможно вспомнить какой у нее был номер. Информация про номер машины была просто несущественной и не была отложена в памяти как признак увиденного.

Для реализации такой модели необходимо обучить две нейронные сети с зеркальной архитектурой — энкодер (encoder) и декодер (decoder). Энкодер будет отвечать за то, чтобы найти точку на пространстве признаков соответствующую входному изображению, а декодер, наоборот, должен будет найти изображение, соответствующее

щее такой точке. Обучение этих нейронных сетей в паре дает большое преимущество с точки зрения маркировки данных — одно и то же изображение будет являться как входными данными, так и правильным ответом для модели. Однако, такой подход не обеспечивает никакого контроля за тем, каким образом будут распределяться признаки на латентном пространстве (так же известном как пространство признаков или эмбедингов) [2].

В конечном итоге целью разработки VAE является генерация новых изображений по заданным признакам, а это является неоправданно сложной задачей если заранее не будет известно каким образом они распределены. Для того, чтобы обойти данную трудность существует подход известный как репараметризация (reparameterization trick) [3]. Его суть заключается в том, чтобы энкодер вместо точки на латентном пространстве находил параметры распределения точек, соответствующих входному изображению. При этом декодер будет получать на вход одну из таких точек полученную случайным выбором на основе описанных энкодером параметров распределения (см. схему на рис. 1).

Таким образом, если в общую функцию потерь добавить значение метрики удаленности полученного энкодером распределения от стандартного нормального (дивергенции Кульбака-Лейблера [4]), то модель будет вынуждена распределять признаки изображений более кучно так как это будет снижать значение потерь. Это даст возможность более плавно переходить от одной картинки к другой при применении линейных операций к их представлениям

Данную модель можно применять как основу для генерации видео следующим образом: пусть есть видео-образец, на котором человек совершает какие-то движения, каждый кадр такого видео будет иметь свое представление, которое его описывает, а значит для любой пары соседних кадров разность будет выражена только тем, как сдвинулся человек. Так, если взять пред-

ставление фотографии другого человека и последовательно добавлять к нему разности представлений между парами соседних кадров видео-образца, то на каждом шаге мы будем иметь представление человека с фотографии,двигающегося подобно человеку с видео. Восстановив полученные представления при помощи декодера, мы получим множество упорядоченных изображений, которые могут быть смонтированы в видео с человеком из начальной фотографии.

Для изучения работы данного метода мы создали вариационный автоэнкодер, обрабатывающий трехканальные изображения 64x64 пикселя. Энкодер и декодер данной модели работающие с 200-мерным признаковым пространством и состоящие из 7 сверточных и 3 линейных слоев были обучены на 250 тысячах изображений людей на 30 эпохах (см. схему энкодера и декодера на рис. 2). Реализация модели выполнялась на языке программирования Python при помощи библиотеки PyTorch с задействованием модуля DataLoader для осуществления потоковой подачи данных из постоянной памяти устройства в модель. Оптимизация реализованной модели выполнялась при помощи алгоритма Adam с функцией потерь при реконструкции BCELoss.

Как можно видеть на рис. 3, нейронная сеть обучилась воссоздавать изображения людей лишь в общих чертах — видны элементы одежды и основные черты лица, однако все остальное остается очень размытым и не детальным. Данную проблему удалось бы минимизировать, увеличив число обучаемых параметров в модели, но данное решение является как очень затратным с точки зрения вычислительных ресурсов, так и не устраняющим корень проблемы. С данным несовершенством полученного результата связан основной недостаток модели VAE — нечеткость генерируемых изображений. Его причина может крыться в слишком малой размерности признакового пространства и в несовершенстве части функции потерь, рассчитывающей качество полученного изображения. И если размерность признако-

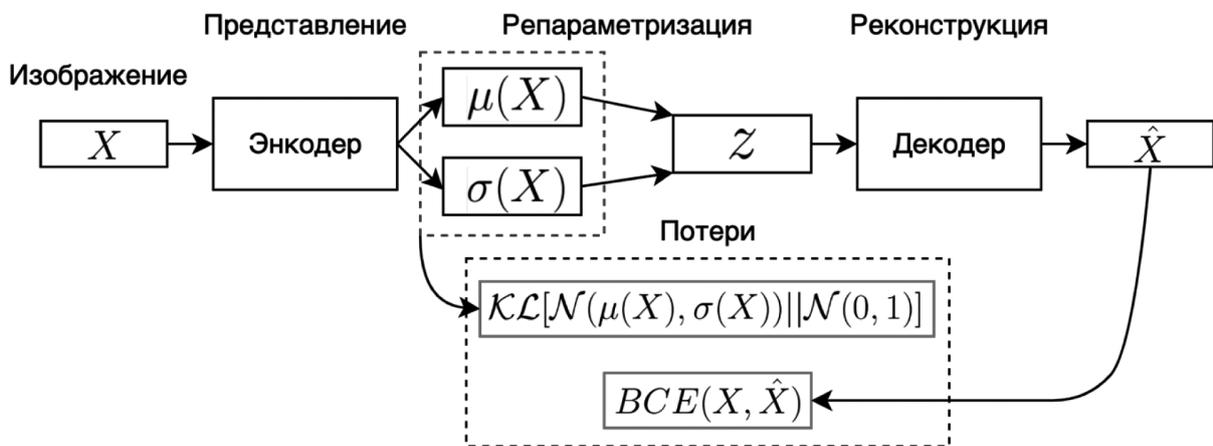


Рис. 1. Схема устройства вариационного автоэнкодера

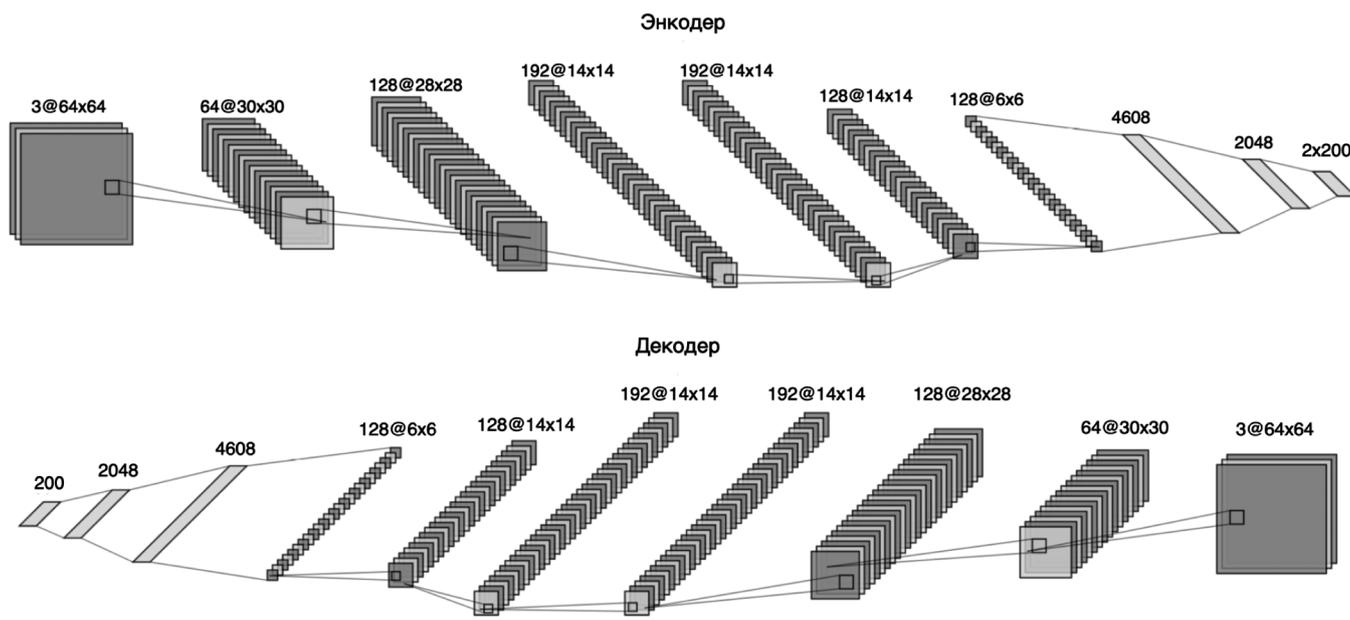


Рис. 2. Схема структуры энкодера и декодера



Рис. 3. Визуализация реконструкции изображений при помощи VAE

го пространства при необходимости можно просто увеличить, то с оценкой качества изображений возникают определенные трудности.

Обычно для такой оценки применяют метод суммы квадратов разностей или перекрестной энтропии между значениями цветов пикселей начального и полученного изображения, однако все это является не совсем подходящими критериями того, что мы сами считаем качественным изображением. Данные критерии можно по истине назвать чрезвычайно сложными, однако нам ничто не запрещает вновь прибегнуть к помощи нейронных сетей для того, чтобы определить их.

По своей сути эта идея не является новой, именно она лежит в основе генеративно-сопоставительных моделей, где две нейронные сети — генератор и дискриминатор обучаются в паре. Генератор создает изображения из случайно созданного шума, а дискриминатор дает оценку того, насколько получившееся изображение похоже на настоящее. Так, если генератор создаст изображение, которое дискриминатор сочтет реальным, то значение его потерь будет минимальным и наоборот. За счет этого принципа и происходит обучение. Самое

главное, что применение данной концепции не противоречит VAE, поэтому объединив их можно добиться лучших свойств от обоих этих моделей.

Объединение VAE и GAN.

Прежде чем приступить к реализации улучшенной модели необходимо отметить, что дискриминатор сам по себе не сможет заменить функцию потерь вариационного автоэнкодера. Согласно принципам устройства сопоставительных моделей в этом случае вместо желаемых реконструкций получатся какие-то случайные изображения людей. Для предотвращения подобного исхода потеря модели должны состоять из трех частей: потерь при репараметризации, стандартных потерь при реконструкции и потерь дискриминатора при целевом значении соответствующему не сгенерированному изображению. Каждая часть функции потерь в таком случае может иметь разные порядки, поэтому для них необходимо подобрать правильные гиперпараметры в соответствии с их значимостью для модели.

Таким образом, реализовав дискриминатор, состоящий из 4 сверточных и 3 линейных слоев была усовершенствована

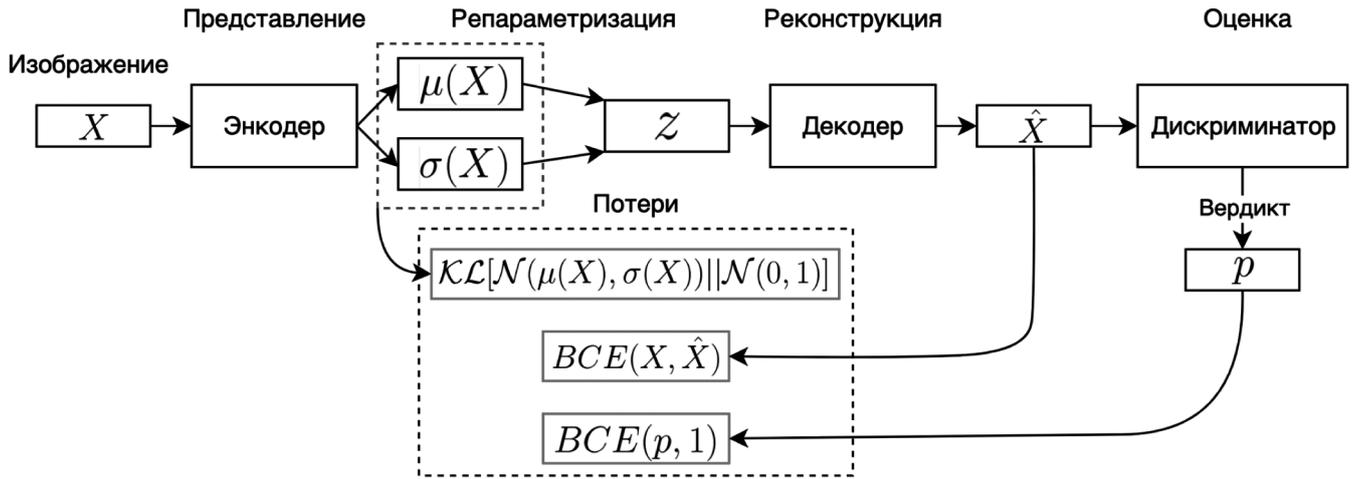


Рис. 4. Схема устройства VAE с дискриминатором

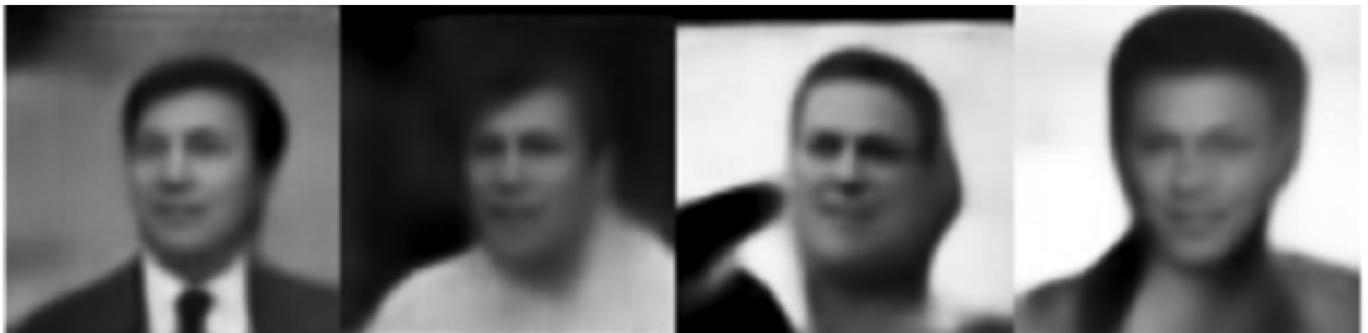


Рис. 5. Визуализация реконструкции изображений при помощи VAE+GAN

шенствована описанная в предыдущей главе модель (см. схему на рис. 4). Итерации обучения при этом были разбиты на сегменты обучения дискриминатора по реальным и созданным VAE фотографиям и, затем, обучения VAE при помощи вердикта, данного дискриминатором. Рассмотрим результаты такого обучения при все той же обучающей выборке на 30 эпохах обучения:

Как можно видеть на рисунке 5, качество реконструкций заметно улучшилось по сравнению с реконструкциями VAE изображенными на рисунке 3. Теперь, когда полученные реконструкции получились достаточно детальными, чтобы иметь возможность различать выражения лиц, можно генерировать кадры видео, согласно принципу изложенному в начале статьи.



Рис. 6. Исходное изображение человека



Рис. 7. Раскадровка видео-образца (сверху) и сгенерированного видео моделью VAE+GAN (снизу)

Несмотря на некоторые погрешности, на рисунке 7 видно, как человек с изображенный на рисунке 6 движется в такт человеку на видео-образце. На сгенерированном видео прослеживаются как изменения в мими-

ке, так и движения головы. Тем не менее стоит обратить внимание на то, что человек на сгенерированном видео слишком много улыбается — данный эффект, предположительно, связан с особенностью используемой обучающей выборки The IMDB-WIKI dataset [5]. Поэтому, для лучшего качества генерации видео стоит использовать обучающие выборки, собранные из кадров других видео. Такие данные дадут возможность модели лучше выучить мимические движения.

Для лучшего понимания преимуществ модели VAE+GAN по сравнению с VAE, также приведем раскадровку видео сгенерированную VAE по аналогичным входным данным:



Рис. 8. Раскадровка сгенерированного видео моделью VAE

Описанная технология генерации видео может быть применена в индустрии видео-хостинга, киноиндустрии и в сфере развлечений.

Полученное решение можно усовершенствовать, повысив качество генерации видео. Для этого необхо-

димо увеличить размер обрабатываемых изображений до 1920x1080 и увеличить число обучаемых параметров, задействовав более совершенные вычислительные мощности, а также повысить качество обучающих данных, дополнив их изображениями людей с разнообразными выражениями лиц, что является целью дальнейшей работы.

Заключение

Рассмотрена задача синтеза видео с использованием нейронных сетей.

С этой целью создана модель в виде вариационного автоэнкодера, позволяющего представить кадры видео в пространстве признаков и затем собрать обратно по требуемому паттерну.

Для повышения качества генерируемых кадров добавлена генеративно-состязательная модель.

В результате, при совместном использовании указанных моделей возможно осуществлять покадровую генерацию видео с заменой действующих персонажей в автоматическом режиме. При этом персонаж будет выполнять те же действия и мимику, что и его прототип.

Программная часть реализована с использованием библиотек PyTorch, PIL и numpy.

Проект имеет хороший потенциал для развития, ограниченный на данном этапе лишь доступной вычислительной мощностью и трудоемкостью сбора обучающих данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Creative Reality Studio URL: <https://www.d-id.com/creative-reality-studio/> (дата обращения: 11.04.2024).
2. Эмбединги для начинающих // HABR.COM: 2024 18 янв. URL: <https://habr.com/ru/companies/otus/articles/787116/> (дата обращения 19.05.2024).
3. Репараметризация в вариационных автоэнкодерах // BAELDUNG.COM: 2023 11 июня URL: <https://www.baeldung.com/cs/vae-reparameterization> (дата обращения: 06.01.2024).
4. Энтропия и дивергенция Кульбака-Лейблера // YANDEX.RU: учебник по машинному обучению 2020. URL: <https://education.yandex.ru/handbook/ml/article/eksponencialnyj-klass-raspredelenij-i-princip-maksimalnoj-entropii> (дата обращения: 21.02.2024).
5. The IMDB-WIKI dataset // ETHZ.CH: URL: <https://data.vision.ee.ethz.ch/cvl/rrothe/imdb-wiki/> (дата обращения: 23.11.2023).
6. Мозговой И.В. Распознавание неопределенных объектов с использованием нейросетей / И.В. Мозговой // Материалы Ежегодной межвузовской студенческой научной конференции ОЧУ ВО «Еврейский университет»: сборник тезисов, Москва, 05 апреля 2020 года / ОЧУ ВО «Еврейский университет». — Москва: ООО «МАКС Пресс», 2020. — С. 317–323. — EDN DURWLI.
7. Соколов В.О. Использование современных технологий для создания образовательных программ / В.О. Соколов, Э.Н. Замага, В.А. Демичев // Антропологическая дидактика и воспитание. — 2022. — Т. 5, № 2. — С. 232–247. — EDN SKMZTY.

© Высоцкий Роман Николаевич (roman0810.r@gmail.com); Демичев Василий Анатольевич (vademichev@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

МЕТОДЫ РАСПОЗНАВАНИЯ КОНЧИКОВ АСТРОЦИТОВ НА МИКРОСКОПИЧЕСКИХ СНИМКАХ

METHODS FOR RECOGNIZING ASTROCYTE TIPS IN MICROSCOPIC IMAGES

A. Egorchev
R. Gimadutdinov
A. Fahrutdinov
D. Chikrin
A. Aganov
M. Paveliev

Summary. The article discusses the use of various machine vision methods for finding astrocyte tips in microspike images. The methods based on the convex hull, the method based on the morphological skeleton, and the method based on machine learning (neural networks) are considered. The results of the methods are studied, and conclusions are drawn based on the results of the methods. The results of the neural network turned out to be close to the results of the morphological skeleton method, and a conclusion is made about the prospects for its use on larger data sets.

Keywords: machine vision, machine learning, neural networks, processing of microscopic images, medical image analysis, astrocyte analysis, perineuronal networks.

Егорчев Антон Александрович

кандидат технических наук, директор, ФГАОУ ВО
«Казанский (Приволжский) федеральный университет»
anton@egorchev.ru

Гимадудтинов Рустем Маратович

аспирант, ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский)
федеральный университет»
RuMGimadutdinov@stud.kpfu.ru

Фахрутдинов Адель Фердинантович

ведущий инженер-программист, ФГАОУ ВО «Казанский
(Приволжский) федеральный университет»
timvaz@yandex.ru

Чикрин Дмитрий Евгеньевич

кандидат технических наук, доцент, директор,
ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский)
федеральный университет»
dmitry.kfu@ya.ru

Аганов Альберт Вартамович

Доктор физико-математических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский)
федеральный университет»
Albert.Aganov@kpfu.ru

Павельев Михаил Николаевич

кандидат технических наук, научный сотрудник,
ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный
университет» paveliev@outlook.com

Аннотация. В статье рассматривается применение различных методов машинного зрения для нахождения кончиков астроцитов на микроскопических снимках. Рассмотрены методы на основе выпуклой оболочки, метод на основе морфологического скелета, метод на основе машинного обучения (нейросети). Исследованы результаты работы методов, получены выводы по результатам работы методов. Результаты работы нейронной сети получились близкими к результатам метода морфологического скелета, сделан вывод о перспективах ее использования на увеличенных наборах данных.

Ключевые слова: машинное зрение, машинное обучение, нейросети, обработка микроскопических снимков, анализ медицинских изображений, анализ астроцитов, перинейрональные сети.

Введение и постановка задачи

Создание программных средств для количественного анализа микроструктуры астроцитов в гистологических срезах мозга открывает возможность для широкомасштабного исследования роли астроцитов и их морфологических изменений в эпилепсии и ряде других заболеваний головного мозга [1]. В частности, распознавание отростков астроцитов позволит автоматически детектировать их колокализацию с перинейрональными сетями и синаптическими маркерами как воз-

буждающих, так и тормозных синапсов и, таким образом, количественно исследовать роль астроцитов в четырехкомпонентной структуре синапсов головного мозга в норме и патологии [2]. Кроме того, такие программные средства могут дать возможность детектировать гипертрофию тел клеток реактивных астроцитов, а также изменения структуры GFAP-положительного цитоскелета в моделях эпилепсии и других патологий мозга, а затем перейти к исследованию этих изменений морфологии в тканях мозга пациентов с различными формами астроглиоза [3].

Рассматривается задача распознавания кончиков астроцитов на перифокальных микроскопических снимках срезов мозга мышей. Требуется по исходному бинаризованному изображению т.е. маске астроцита распознать все его кончики. В примере на рис. 1 (б) показаны кончики астроцитов, которые требуется найти на исходном изображении микроскопического снимка астроцита (а).

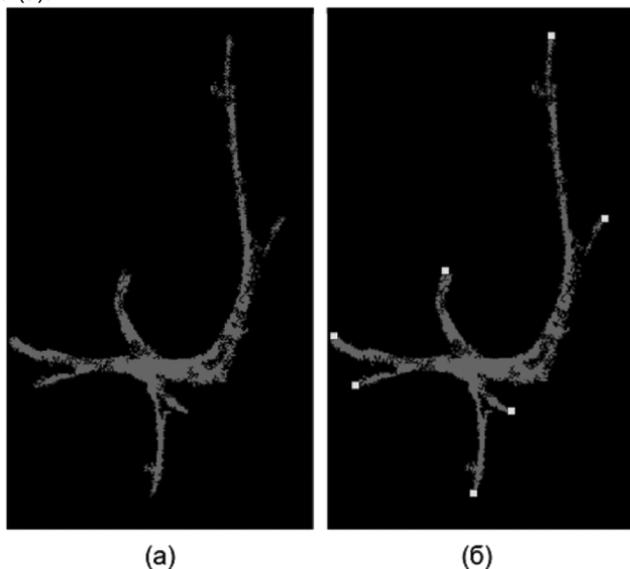


Рис. 1. (а) — исходное бинаризованное изображение астроцита, (б) — выделенные кончики астроцитов

Метод на основе выпуклой оболочки



Рис. 2. Визуализация работы алгоритма

Данный метод выделения кончиков астроцитов был реализован на языке Python с применением библиотеки алгоритмов компьютерного зрения OpenCV. Работает он следующим образом. Поскольку маска астроцита не всегда представляет собой связную фигуру и может содержать некоторые разрывы, то в первую очередь производится морфологическая операция дилатации

ядром 5x5 из единиц и затем применяется операция эрозии ядром 3x3 из единиц. После данных операций бинарное изображение астроцита становится более цельной и замкнутой фигурой. Далее на получившемся изображении выполняется извлечение контуров с помощью функции `findContours` из OpenCV и из выделенных ею контуров выбирается один контур, который имеет наибольшую площадь. После этого, с помощью функции `convexHull` строится выпуклая оболочка максимального контура, на рис. 2 вершины выпуклой оболочки показаны белым цветом, а границы самой выпуклой оболочки — светло-серым.

На рис. 3 представлены примеры результатов работы данного алгоритма на имеющемся наборе данных бинарных изображений астроцитов, белыми точками отмечены кончики астроцитов. Как можно заметить, обнаруживаются около половины кончиков астроцитов, что объясняется тем, что данный метод способен обнаруживать только внешние кончики, то есть лежащие на выпуклой оболочке.

Метод на основе морфологического скелета

Данный метод выделения кончиков основывается на анализе морфологического скелета астроцита. Скелетизацией называется процесс уменьшения толщины исследуемого объекта на изображении до одного пикселя. Такое однопиксельное представление объекта, называемое морфологическим скелетом, полезно при исследовании топологии объекта. Построение морфологического скелета позволяет отделить сам объект от его графического представления, сохраняя его структуру [5]. Одним из популярных алгоритмов для построения морфологических скелетов является алгоритм Зонга-Суня [6], который делая последовательные проходы изображения, удаляет граничные пиксели при условии, что они не нарушают связность объекта.

Чтобы получить скелет исследуемого астроцита, он должен представлять собой связную фигуру без разрывов, поэтому сначала выполняется морфологическая операция дилатации ядром 13x13 из единиц, затем операция эрозии ядром 11x11 из единиц, после чего дополнительно выполняется медианное размытие ядром 5x5 с последующей бинаризацией, чтобы сделать линии более гладкими, что уменьшает количество лишних веток при скелетизации. Далее, выполняется, собственно, скелетизация преобразованного изображения. Была использована функция `skeletonize` из библиотеки `scikit-image` является реализацией алгоритма скелетизации Зонга-Суня. После того как морфологический скелет астроцита получен, по нему достаточно просто определить кончики. Поскольку скелет имеет толщину, равную одному пикселю, то его концами являются такие принадлежащие ему пиксели, у которых в окрестности

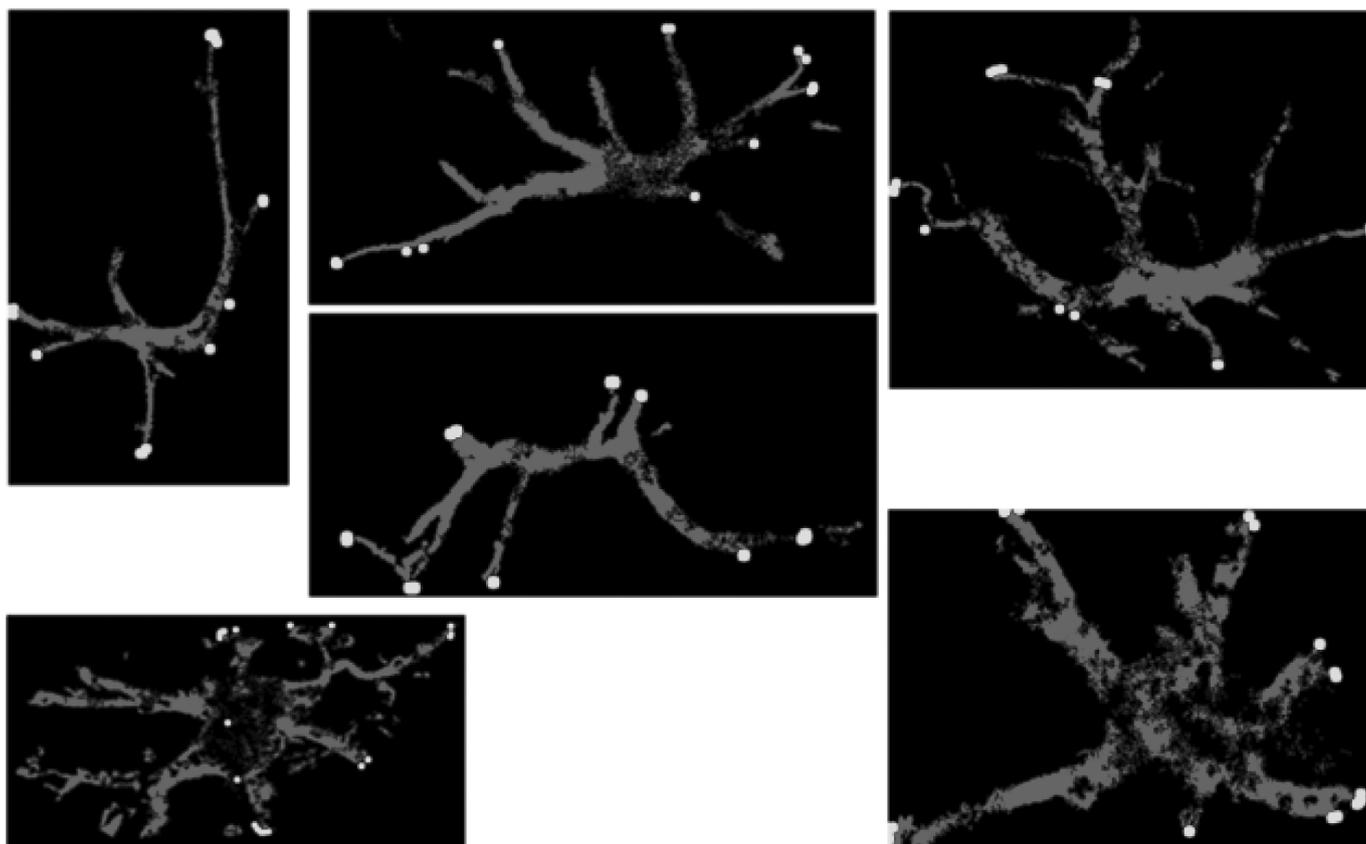


Рис. 3. Результаты работы метода

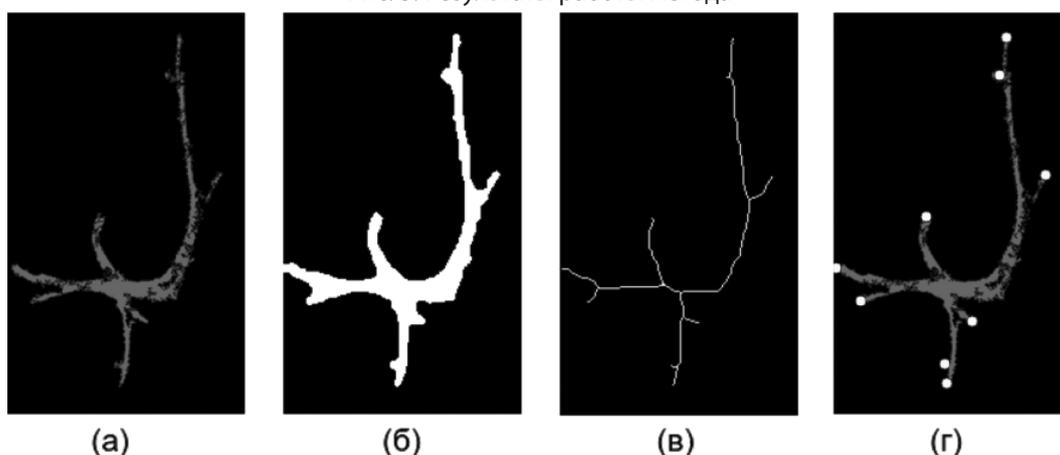


Рис. 4. Этапы работы метода. (а) — исходное изображение астроцита, (б) — изображение после предварительной обработки, (в) — морфологический скелет астроцита, (г) — результат работы алгоритма

из 8 смежных с ними по стороне и по диагонали пикселей только один пиксель принадлежит скелету.

На рис. 5 показано сравнение метода выделения кончиков астроцитов на основе выпуклой оболочки и метода на основе морфологического скелета. Как можно видеть на рисунке, метод на основе морфологического скелета, в отличие от первого метода, способен распознавать «внутренние» кончики астроцитов, то есть те, которые не выходят за пределы выпуклой оболочки. Кроме того, видно, что метод на основе морфологического

скелета не допускает ложных срабатываний там, где они есть у первого метода, однако, может находить кончики там, где их нет, из-за дефектов построенного морфологического скелета.

На рис. 6 представлены примеры результатов работы данного алгоритма на наборе данных бинарных изображений астроцитов, кончики астроцитов отмечены красными точками. Как можно визуально заметить, больше половины кончиков астроцитов успешно обнаруживаются, поскольку теперь, в отличие от метода на основе

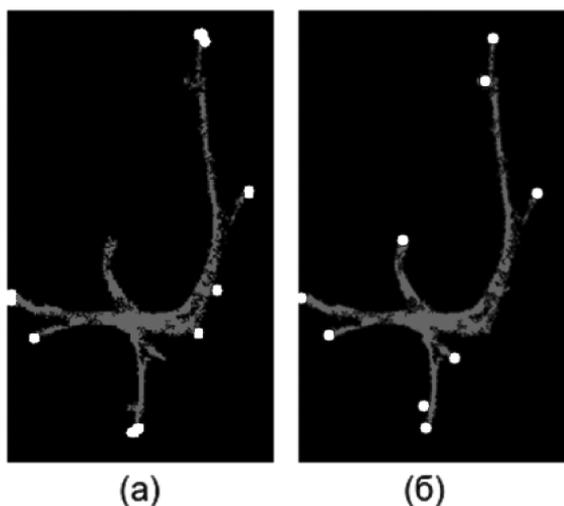


Рис. 5. Сравнение работы двух методов на примере.
(a) — результат метода на основе выпуклой оболочки,
(б) — результат метода на основе морфологического скелета

выпуклой оболочки, внутренние кончики обнаруживаются.

Метод на основе машинного обучения

Задачу обнаружения кончиков астроцитов можно отнести к общей задаче обнаружения объектов (object detection) компьютерного зрения. Для этой задачи существует множество методов машинного обучения с учителем. Таким образом, чтобы применить их нужно предварительно разметить исходные данные с помощью некоторого метода компьютерного зрения без учителя, либо вручную. Методы детекции объектов делятся на два подхода — двухстадийные и одностадийные. В двухстадийных методах процесс детекции объектов состоит из двух этапов: выделения областей интереса, и, собственно, детекции объектов на областях интереса, и эти задачи выполняют разные нейросети. В методах одностадийной детекции обнаружения всех объектов происходит за одной проход по нейросети.

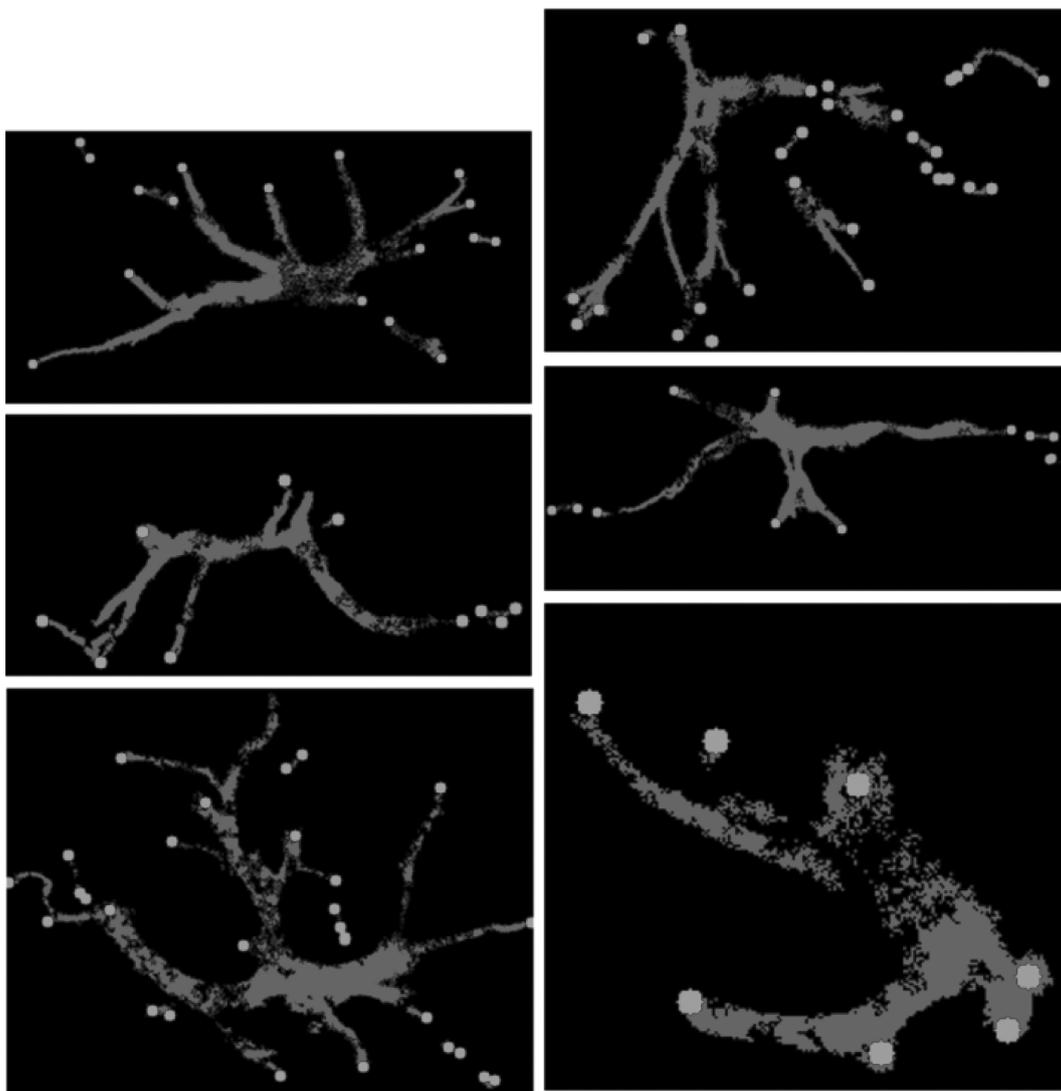


Рис. 6. Результаты работы метода

Представленная на рис. 7 используемая в данном методе архитектура нейронной сети работает следующим образом. Исходное изображение проходит через 9 слоев свертки и 6 слоев операции максимальной подвыборки, в результате чего получаются карты признаков размера 20x20 и 40x40, причем карта признаков 40x40 получается путем слияния информации с картой признаков 13x13, что позволяет получить больше значимой информации из исходного изображения. В карте признаков каждый элемент карт признаков соответствует определенной области на исходном изображении. Для каждого элемента итоговой карты признаков предсказываются смещения относительно 6 т.н. якорей — заранее определенных прямоугольных форм. Каждое предсказание области определяется $5*6+C$ числами, это: смещения координат центра, высоты и ширины предсказываемой прямоугольной области относительно якоря, вероятность наличия объекта и вектор вероятностей принадлежности объекта к каждому из C распознаваемых моделью классов. Итоговая вероятность, например наличия машины в прямоугольнике считается как условная ве-

роятность P (машина|есть объект). В результате получается множество прямоугольников, и нужно отбросить лишние, поэтому сначала прямоугольники отбрасываются по порогу: рассматриваются только те, у которых вероятность наличия объекта больше или равна пороговой. Далее используется метод Non Maximum Supression, который работает следующим образом. Находятся группы пересекающихся прямоугольников одного класса, из группы выбирается прямоугольник с максимальной вероятностью, далее для всех пересекающихся с ним прямоугольников считается IoU (Intersection over Union) т.е. отношение пересечения к объединению, и из этих прямоугольников отбрасывается те, которые имеют IoU выше некоторого порога. Полученные таким образом оставшиеся ограничивающие прямоугольники представляют собой результаты работы модели [8, 9].

Для разметки кончиков астроцитов на исходных бинарных изображениях был использован Метод 2 выделения кончиков астроцитов на основе анализа морфологического скелета. Поскольку для используемой

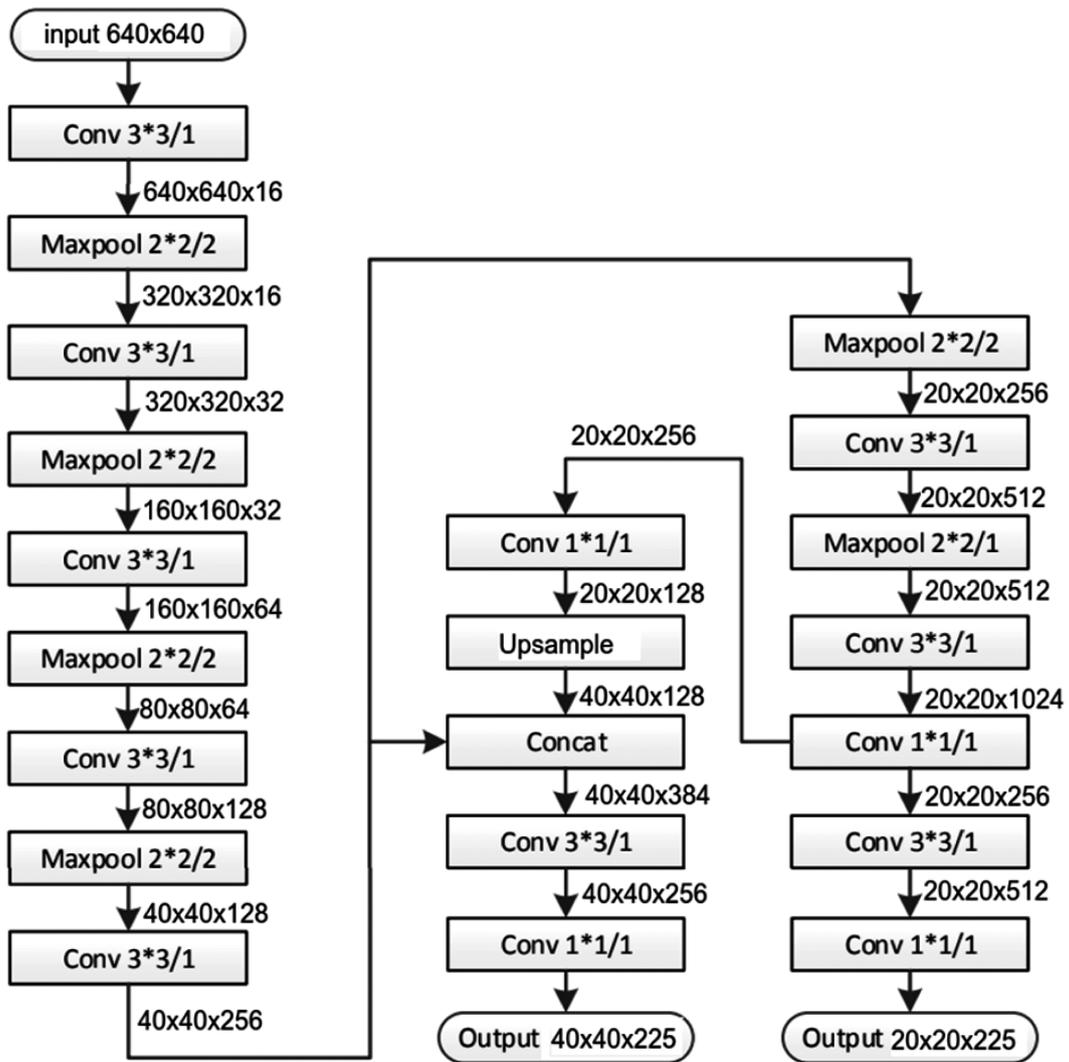


Рис. 7. Архитектура нейросети для обнаружения объектов

архитектуры обнаружения объектов, объекты нужны как некоторые области, а не как точки, то кончики выделяют в прямоугольные области размером 20x20 пикселей с центрами в точках кончиков астроцитов, определенных Методом 2. Пример из размеченного таким образом набора данных показан на рис. 8 кончики астроцитов обведены серыми прямоугольниками.

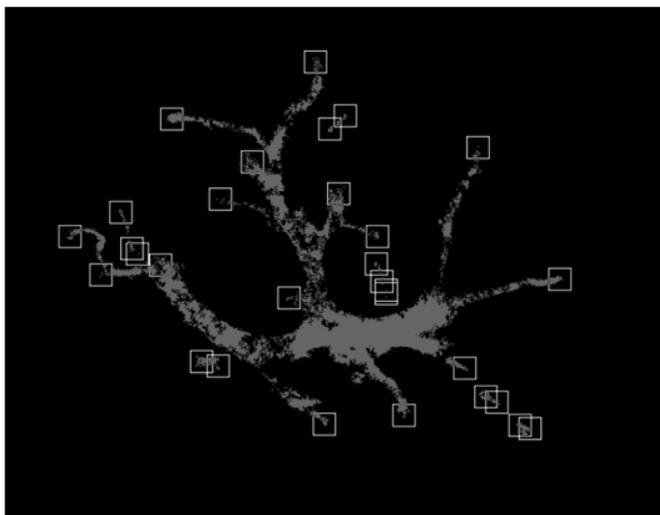


Рис. 8. Визуализация примера из набора данных

Всего в наборе данных 26 изображений, разбитых в соотношении 80 % (20 шт.) на обучающую выборку и 20 % (6 шт.) на тестовую выборку. Это относительно небольшое количество данных для обучения нейросетевой архитектуры детектирования объектов, однако подходящее для проверки применимости метода; в дальнейших исследованиях планируется увеличить обучающую выборку на порядок. Набор данных был сформирован в формате *ultralytics yolo*, и состоит из папки *images*, где находятся исходные маски, и папки *labels*, где лежат соответствующие *txt* файлы для каждого изображения, содержащие координаты прямоугольных областей всех отмеченных астроцитов на изображении.

В качестве инструмента была выбрана предобученная модель *YOLOv3-tiny* из фреймворка решения задач детектирования объектов *Ultralytics*, которая представляет собой реализацию описанной в данном разделе архитектуры для обнаружения объектов. Модель была дообучена в 100 эпох на подготовленном датасете. Дообучение заняло 2 минуты на видео ускорителе *NVIDIA RTX 4060m*. После того как модель была обучена, она была протестирована на 6 изображениях из тестовой части набора данных. Минимальный порог уверенности при детектировании объекта был установлен равным 0.3. На рис. 9 представлены результаты данного тести-

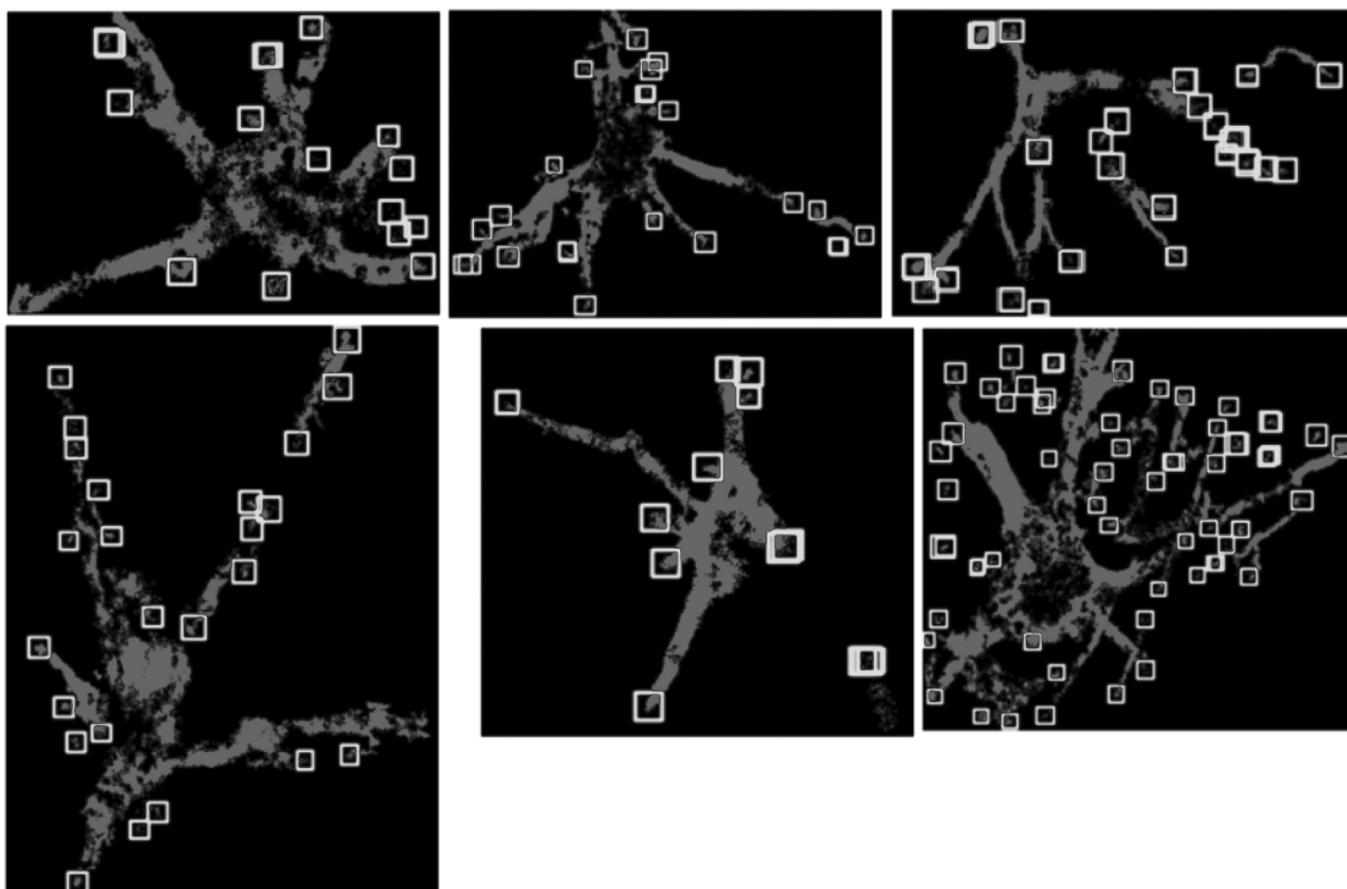


Рис. 9. Результаты тестирования обученной модели

рования модели, как видно, они близки к тем, что были полученным методом морфологического скелета, с помощью которого готовилась обучающая выборка.

Распознавание кончиков астроцитов на исходном микроскопическом снимке

Данный метод состоит в обучении архитектуры детектирования объектов из Метода 3 на исходных микроскопических снимках тех же астроцитов, маски которых использовались ранее. В предыдущих методах использовались только бинарные маски астроцитов, выделенные экспертами из определенных слоев конфокального стака. В исходных данных для каждого астроцита есть конфокальный стак снимков, где заснят именно этот астроцит, но при разной глубине проникновения микроскопа. Таким образом на разные слои стака попадают какие-то части астроцита но на некоторых снимках, обычно расположенных около середины стака астроцит виден максимально, это можно видеть на рис. 10 на слое 16, с него и была получена бинарная маска астроцита. Идея данного метода состоит в том, чтобы использовать набор данных.

Как и в методе 3, в качестве инструмента реализации применена предобученная модель YOLOv3-tiny из фреймворка Ultralytics. Модель была дообучена в 100

эпох на подготовленном датасете. До обучение заняло 2 минуты на видео ускорителе NVIDIA RTX 4060m. После того как модель была обучена, она была протестирована на 6 изображениях из тестовой части набора данных. Минимальный порог уверенности при детектировании объекта был установлен равным 0.15. На рис. 11 представлены результаты работы обученной модели на тестовой выборке. Результаты так же, как и в методе 3 близки к результатам работы метода на основе морфологического скелета, однако тот факт что порог уверенности стал ниже, говорит о том что обнаружение кончиков на исходных микроскопических снимках является более трудной задачей и требует большего объема данных для обучения, чем при использовании бинаризованных изображений астроцитов.

Выводы

Исследованы различные методы для решения задачи распознавания кончиков астроцитов на периферических микроскопических снимках. Исследованы два классических подхода к распознаванию кончиков: на основе выпуклой оболочки и на основе морфологического скелета. Метода на основе морфологического скелета показал результаты лучше и смог обнаруживать более половины кончиков астроцитов, в то время как первый метод на основе выпуклой оболочки показал неудовлет-

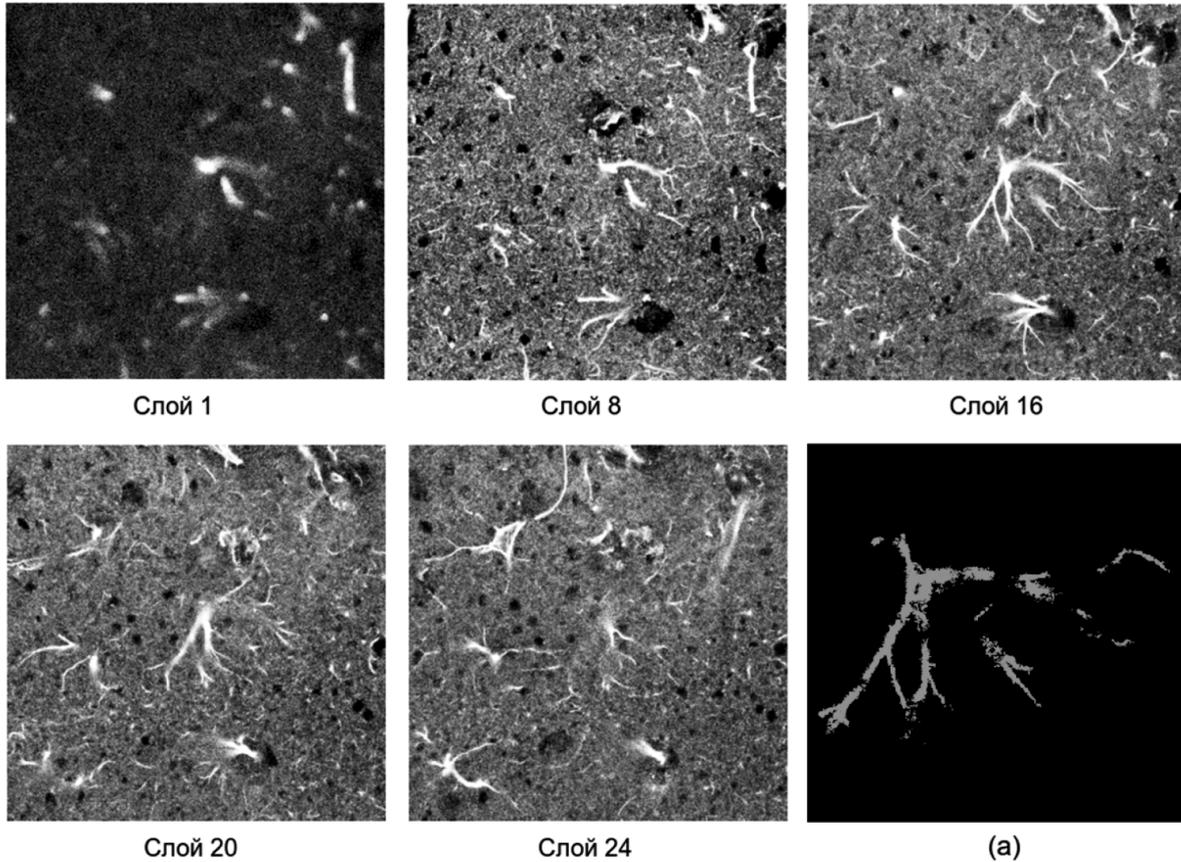


Рис. 10. Слои конфокального стака изображений астроцитов; (a) — экспертная маска данного астроцита

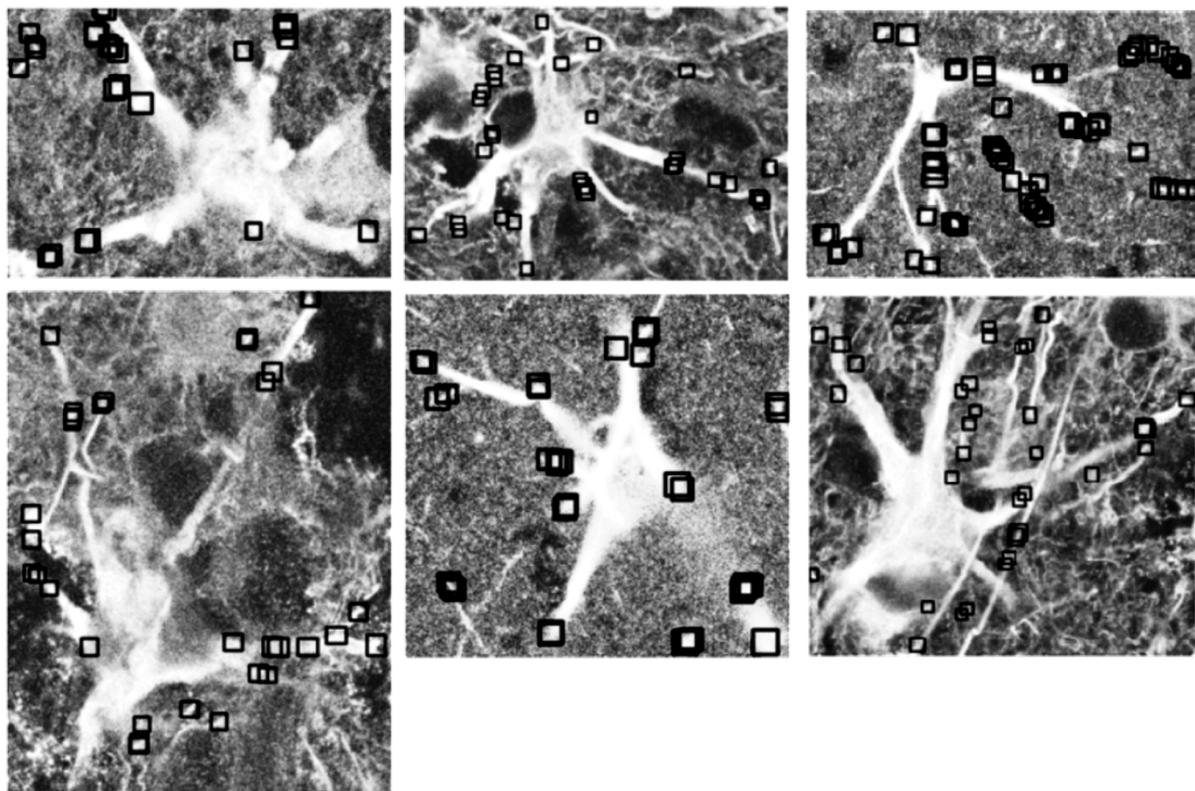


Рис. 11. Результаты работы обученной модели

ворительные результаты в силу того, что он пропускает внутренние, то есть лежащие внутри выпуклой оболочки, кончики астроцитов, в результате чего большая часть кончиков остаются нераспознанными. С помощью разработанного метода выделения кончиков астроцитов на основе морфологического скелета был подготовлен обучающий набор данных для следующего метода —

с использованием машинного обучения. в частности глубокой сверточной нейронной сети для обнаружения объектов. Результаты работы нейронной сети оказались близкими к результатам второго метода, из чего можно сделать вывод о перспективах ее использования на увеличенных наборах данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Verkhatsky A, Butt A, Li B, Illes P, Zorec R, Semyanov A, Tang Y, Sofroniew MV. Astrocytes in human central nervous system diseases: a frontier for new therapies. *Signal Transduct Target Ther.* 2023 Oct 13;8(1):396. doi: 10.1038/s41392-023-01628-9.
2. A. Dityatev and D.A. Rusakov, "Molecular signals of plasticity at the tetrapartite synapse," *Curr. Opin. Neurobiol.*, vol. 21, no. 2, pp. 353–359, Apr. 2011, doi: 10.1016/j.conb.2010.12.006.
3. Kim J, Yoo I.D, Lim J, Moon J.S. Pathological phenotypes of astrocytes in Alzheimer's disease. *Exp Mol Med.* 2024 Feb;56(1):95-99. doi: 10.1038/s12276-023-01148-0.
4. Soumi Paul, Shrouti Gangopadhyay, Ayatullah Faruk Mollah, Subhadip Basu & Mita Nasipuri, Convexity Defects-Based Fingertip Detection and Hand Gesture Recognition, *Proceedings of International*
5. Моделирование распознавания рукописного текста на основе скрытых марковских моделей: монография / И.Я. Львович, Я.Е. Львович, А.П. Преображенский [и др.]. — Воронеж: ВИВТ, 2016. — ISBN 978-5-4446-0838-8, С. 45.
6. Zhang T.Y. A Fast Parallel Algorithm for Thinning Digital Pat-terns [Text] / T.Y. Zhang, C.Y. Suen // *Communications of the ACM*, vol. 27, no. 3, 1984, P. 236–239.
7. Обработка изображений и управление в системах автоматического обнаружения и сопровождения объектов: учебное пособие / Б.А. Алпатов, П.В. Бабаян, О.Е. Балашов, А.И. Степашкин. — Рязань: РГРТУ, 2011. — 234 с.
8. Joseph Redmon, Santosh Divvala, Ross Girshick, Ali Farhadi You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection, 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.
9. Adarsh, P., Rathi, P., & Kumar, M. (2020). YOLO v3-Tiny: Object Detection and Recognition using one stage improved model. 2020 6th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS), 687–694.

© Егорчев Антон Александрович (anton@egorchev.ru); Гимадутинов Рустем Маратович (RuMGimadutdinov@stud.kpfu.ru); Фахрутдинов Аделъ Фердинантович (timvaz@yandex.ru); Чикрин Дмитрий Евгеньевич (dmitry.kfu@ya.ru); Аганов Альберт Вартавович (Albert.Aganov@kpfu.ru); Павелъев Михаил Николаевич (paveliev@outlook.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ БЛОКЧЕЙН НА УПРАВЛЕНИЕ ЦЕПЯМИ ПОСТАВОК

Камышанов Денис Эдуардович

Аспирант, Российская Академия
Народного Хозяйства и Государственной Службы
при Президенте Российской Федерации
eldkkremgg@gmail.com

THE IMPACT OF BLOCKCHAIN TECHNOLOGIES ON SUPPLY CHAIN MANAGEMENT

D. Kamyschanov

Summary. The article examines the impact of blockchain technologies on supply chain management, paying special attention to their ability to increase transparency, traceability, and efficiency. The study examines the advantages and challenges associated with the introduction of blockchain technology in supply chain management. The results show that blockchain technology has the potential to revolutionize the work of supply chains, solving long-standing problems such as fraud, counterfeiting and lack of visibility. However, to fully realize the benefits of blockchain technology in supply chain management, issues such as scalability, interoperability and security need to be addressed.

The purpose of the study is to study the impact of blockchain technologies on supply chain management.

The hypothesis of the study. The integration of blockchain technology into supply chain management systems will lead to dramatic changes in terms of transparency, traceability, and operational efficiency. The cumulative effect of improvements helps to increase consumer confidence in the integrity and reliability of the products and services offered.

Research methods: analysis of scientific literature, method of observation, method of comparison, generalization, and systematization.

Keywords: blockchain, supply chain management, logistics, transparency, security, optimization, digitalization.

Аннотация. В статье рассматривается влияние блокчейн-технологий на управление цепочками поставок, особое внимание уделяется их способности повышать прозрачность, прослеживаемость и эффективность. В исследовании рассматриваются преимущества и проблемы, связанные с внедрением технологии блокчейн в управление цепочками поставок. Полученные результаты свидетельствуют о том, что технология блокчейн способна революционизировать работу цепочек поставок, решая такие давние проблемы, как мошенничество, контрафакция и недостаточная видимость. Однако для полной реализации преимуществ технологии блокчейн в управлении цепочками поставок необходимо решить такие проблемы, как масштабируемость, интероперабельность и безопасность.

Целью исследования является изучение влияния блокчейн-технологий на управление цепочками поставок.

Гипотеза исследования. Интеграция технологии блокчейн в системы управления цепочками поставок приведет к кардинальным изменениям с точки зрения прозрачности, отслеживаемости и операционной эффективности. Совокупный эффект улучшений способствует повышению уверенности потребителей в целостности и надежности предлагаемых продуктов и услуг.

Методы исследования: анализ научной литературы, метод наблюдения, метод сравнения, обобщение и систематизация.

Ключевые слова: блокчейн, управление цепями поставок, логистика, прозрачность, безопасность, оптимизация, цифровизация.

Введение

В условиях современного мира, характеризующегося глобализацией и цифровизацией, управление цепями поставок сталкивается с новыми вызовами и возможностями. Одним из перспективных направлений, способных революционизировать эту сферу, является технология блокчейн.

Изначально разработанная для обеспечения безопасности транзакций в криптовалютах, технология блокчейн открывает новые горизонты для оптимизации логистических процессов, повышения прозрачности и снижения издержек в управлении цепями поставок [6].

В данной статье мы рассмотрим основные аспекты влияния технологии блокчейн на управление цепями поставок, проанализируем её преимущества и вызовы, а также предложим направления дальнейших исследований в этой области.

Результаты

Блокчейн — это революционная система, которая записывает все транзакции в виде серии блоков. Каждый блок кодируется уникальным идентификатором, называемым хэшем, который используется для проверки его подлинности. Благодаря этой надежной системе я уверен, что получу точную информацию, если буду участвовать в ней.

В отличие от традиционных систем, блокчейн не имеет центрального органа, который контролирует всю сеть. Вместо этого он опирается на децентрализованную сеть участников, которые используют технологию смарт-контрактов для обеспечения целостности и безопасности системы. Эти контракты являются самоисполняющимися и регулируются строгими правилами, что устраняет необходимость в посредниках и снижает риск мошенничества [2, 5].

Благодаря технологии блокчейн существует большой интерес к сфере криптовалют, и в последнее время был обнаружен ряд перспективных проектов, поскольку эта технология может обеспечить значительные преимущества. Блокчейн играет важную роль в управлении цепочками поставок, поскольку он может повысить эффективность и прозрачность обмена информацией, что имеет решающее значение для развития распределенных интернет-технологий. Эта технология обеспечивает безопасную и надежную передачу данных, что делает ее идеальным решением для предприятий любого размера.

Отслеживаемость — важный аспект управления цепочкой поставок, который может быть значительно улучшен с помощью технологии блокчейн [1]. Создавая цифровой след истории продукта, блокчейн позволяет легко отслеживать товары от их происхождения до конечного пункта назначения. Это особенно ценно в таких отраслях, как пищевая промышленность, фармацевтика и предметы роскоши, где потребители все чаще требуют прозрачности и подотчетности. Блокчейн также может способствовать соблюдению нормативных требований, таких как стандарты безопасности пищевых продуктов и этические методы поиска поставщиков.

Например, в индустрии предметов роскоши блокчейн можно использовать для проверки подлинности товаров и предотвращения попадания контрафактных товаров на рынок. Отслеживая путь товара от производителя к розничному продавцу, потребители могут быть уверены, что приобретают подлинный продукт. В индустрии этичных поставок блокчейн можно использовать для отслеживания происхождения материалов и обеспечения того, чтобы они поступали от устойчивых и этичных поставщиков.

Эффективность — еще одно ключевое преимущество технологии блокчейн в управлении цепочками поставок [3]. Оптимизируя процессы и сокращая потребность в ручном вмешательстве, блокчейн может привести к значительной экономии средств и повышению операционной эффективности. Блокчейн может автоматизировать обмен документами, такими как счета-фактуры и подтверждения отгрузки, сокращая бумажную волокиту и административную нагрузку. Кроме того, блокчейн может оптимизировать управление запасами, предоставляя информацию об уровнях запасов в режиме реального времени и снижая риск их нехватки или избыточных запасов.

В судоходной отрасли блокчейн можно использовать для автоматизации процесса таможенного оформления, сокращая время и затраты, связанные с этим процессом. В обрабатывающей промышленности блокчейн можно использовать для отслеживания перемещения материалов и компонентов в процессе производства, повышения эффективности и сокращения отходов.

Несмотря на то, что потенциальные преимущества технологии блокчейн в управлении цепочками поставок значительны, существуют и проблемы, требующие решения [3]. К ним относятся проблемы масштабируемости, интероперабельности и безопасности. Однако постоянный прогресс в технологии блокчейн и разработка отраслевых решений постепенно преодолевают эти препятствия.

Ожидается, что по мере развития технологии блокчейн ее влияние на управление цепочками поставок станет еще более значительным. Повышая прозрачность, отслеживаемость и эффективность, блокчейн обладает потенциалом для преобразования методов работы бизнеса и создания большей ценности для всех заинтересованных сторон.

Обсуждение

Предприниматели осознали потенциал блокчейна для оптимизации рабочих процессов в компаниях. И одним из таких процессов является управление цепочками поставок. Появление технологии блокчейн положило начало смене парадигмы в области логистики и управления цепочками поставок, предложив преобразующий подход к операционной деятельности. Используя возможности блокчейна, предприятия могут повысить прозрачность, повысить безопасность, оптимизировать эффективность и способствовать устойчивому развитию.

Ключевое преимущество блокчейна заключается в его способности служить единым, неизменным источником достоверности для каждой транзакции в цепочке поставок, эффективно разрешая споры и укрепляя доверие между заинтересованными сторонами [9]. Блокчейн позволяет отслеживать углеродный след продукта, позволяя компаниям смягчать воздействие на окружающую среду и соответствовать целям устойчивого развития.

Более того, технология блокчейн позволяет создавать смарт-контракты, само исполняющиеся соглашения с условиями, непосредственно встроенными в код. Эти контракты автоматизируют различные процессы в цепочке поставок, такие как платежи, транспортировка и обеспечение качества, снижая риск ошибок, задержек и повышая общую операционную эффективность.

Еще одним важным преимуществом технологии блокчейн является ее способность устранять традиционных посредников в цепочках поставок. Устраняя необходимость в посредниках, блокчейн обладает потенциалом снижения издержек и повышения прозрачности. Это особенно выгодно для малого бизнеса и стран с формирующейся экономикой, которые часто сталкиваются с трудностями при конкуренции в глобальных сетях поставок.

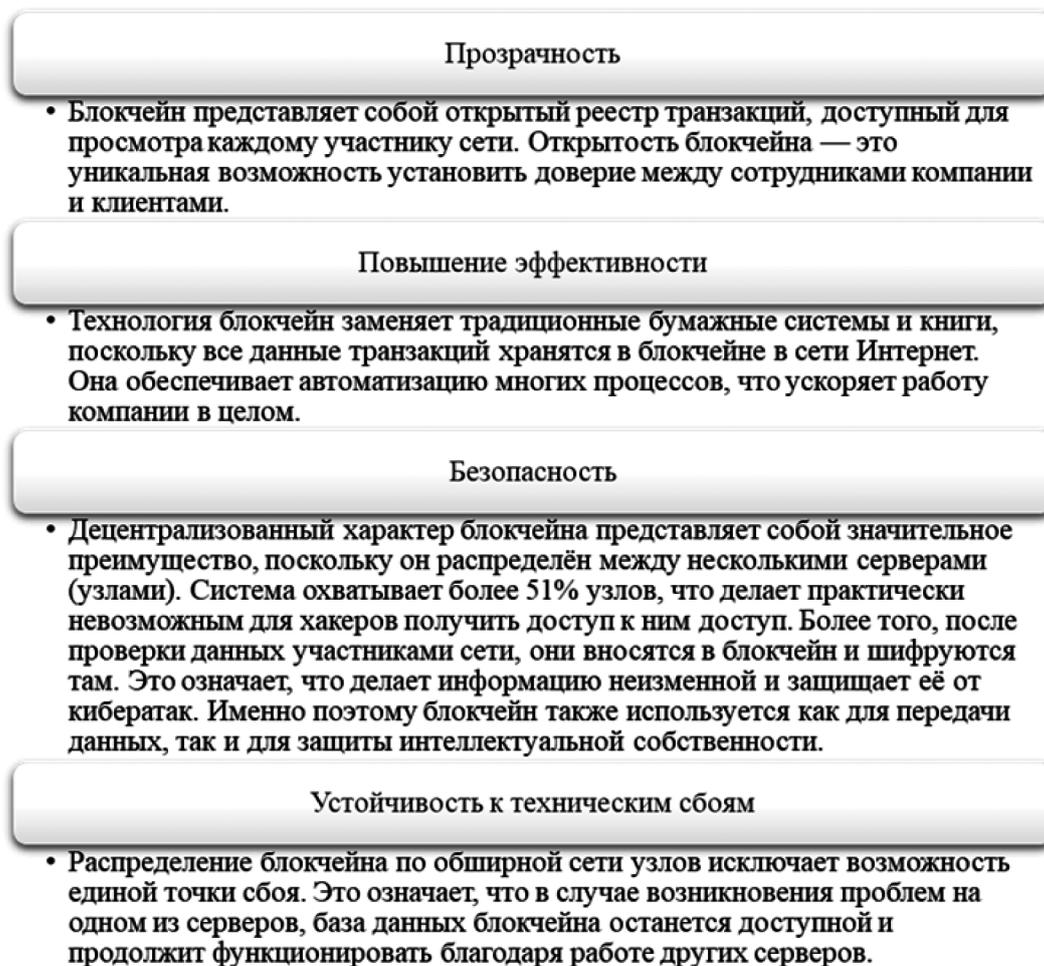


Рис. 1. Преимущества технологии блокчейн для компаний [1, 8, 9]

Кроме того, технология блокчейн позволяет отслеживать происхождение продуктов, обеспечивая соблюдение этических и устойчивых стандартов. Это способствует повышению репутации компаний и укреплению доверия потребителей. Например, блокчейн можно использовать для отслеживания происхождения пищевых продуктов, гарантируя отсутствие в них опасных химических веществ или генетически модифицированных ингредиентов.

В дополнение к вышеупомянутым преимуществам технология блокчейн также обладает потенциалом для повышения устойчивости цепочки поставок. Благодаря децентрализованному и неизменяемому записям транзакций блокчейн может эффективно снижать риски, связанные со сбоями, вызванными стихийными бедствиями, геополитическими явлениями или непредвиденными событиями [2, 7].

Тем не менее, интеграция блокчейна в логистику и управление цепочками поставок сопряжена с рядом проблем. Одной из серьезных проблем является масштабируемость блокчейн-сетей, поскольку увеличение количества транзакций может привести к сниже-

нию производительности сети. Кроме того, существуют опасения по поводу потребления энергии, связанного с блокчейном, несмотря на продолжающиеся усилия по разработке более энергоэффективных согласованных алгоритмов. Воздействие использования блокчейна на окружающую среду остается важной проблемой.

Несмотря на существующие препятствия, потенциальные преимущества технологии блокчейн для логистики и управления цепочками поставок значительны. Решая эти проблемы и постоянно разрабатывая инновационные решения, предприятия могут использовать возможности этой технологии для улучшения своей деятельности, снижения расходов и укрепления доверия со своими клиентами [8].

Множество компаний по всему миру уже внедрило технологию блокчейн в свои цепочки поставок, начиная от производства продуктов питания и заканчивая автомобилестроением. Рассмотрим бренды, которые использовали инновационный подход для оптимизации своих производственных процессов:

— Walmart, продуктовый ритейлер, одним из первых внедрил блокчейн в свою цепочку поставок. Ком-

пания тщательно отслеживает каждый этап производства продуктов питания, от фермы до полок магазинов, предоставляя покупателям возможность проверять происхождение своих покупок. Такая комплексная отслеживаемость позволяет Walmart быстро выявлять и отзываться некачественные товары еще до того, как они поступят на склад, обеспечивая высочайшие стандарты качества.

- Unilever, мировой лидер в производстве продуктов питания и товаров для дома, также использует технологию блокчейн. В настоящее время компания активно внедряет эту технологию в свою цепочку поставок чая, уделяя особое внимание тщательному отслеживанию поставщиков, чтобы обеспечить высочайшее качество на каждом этапе производственного процесса.
- Мебельный ритейлер IKEA использует технологию блокчейн для отслеживания происхождения и перемещения материалов и изделий по всей цепочке поставок. Это позволяет бренду предоставлять прозрачную информацию своим клиентам о том, откуда поступают их товары и какие шаги предпринимаются для обеспечения их подлинности.
- De Beers, алмазодобывающая компания, использует блокчейн для отслеживания местоположения, метода добычи и пути следования каждого алмаза от рудника до конечного пункта назначения. Благодаря такому тщательному отслеживанию компания гарантирует подлинность и сертификацию каждого алмаза.
- Ford, производитель автомобилей, использует технологию блокчейн для отслеживания поставок важнейшего сырья, в частности кобальта, на свои заводы. Это позволяет компании гарантировать подлинность своих материалов, тем самым поддерживая высокие стандарты качества своих автомобилей.

Другие известные компании, которые интегрировали блокчейн в свои цепочки поставок, включают Alibaba Group, гиганта электронной коммерции, и Home Depot, ведущего поставщика строительных материалов. Кроме того, некоторые корпорации, такие как Nestle, расширили использование технологии блокчейн для конкретных брендов в своем портфолио, таких как кофейный бренд Zoëgä.

Таким образом, появление технологии блокчейн знаменует собой прорыв в области логистики и управления цепочками поставок. Благодаря внедрению блокчейн-решений компании могут повысить прозрачность, безопасность, эффективность и устойчивость своей деятельности. Несмотря на трудности, которые необходимо преодолеть, выгоды от этого существенны. По мере развития технологий мы можем ожидать еще более иннова-

ционных решений и преимуществ, которые еще больше преобразят отрасль.

Внедрение технологии блокчейн повышает прозрачность и безопасность цепочек поставок, тем самым значительно повышая операционную эффективность. Хотя процесс интеграции этой технологии может показаться пугающим, преимущества блокчейна намного перевешивают проблемы, связанные с его внедрением. В эпоху стремительной трансформации рынка блокчейн стал незаменимым инструментом для бизнеса, стремящегося к процветанию.

Выводы

В рамках данного исследования проведено изучение возможностей блокчейн-технологий в управлении цепочками поставок. Рассмотрены различные аспекты влияния блокчейна на прозрачность, отслеживаемость и эффективность, что позволило выявить его значимое воздействие на современный бизнес.

Полученные результаты показали, что блокчейн способен значительно повысить уровень прозрачности, способствуя формированию более справедливой и подотчетной экосистемы в цепочках поставок. Создавая неизменяемый реестр транзакций, блокчейн снижает риск мошенничества, контрафакции и неэтичных действий. Кроме того, благодаря возможности отслеживать товары от их происхождения до конечного пункта назначения, потребители получают более полную информацию о приобретаемых товарах и могут быть более уверены в их качестве.

Исследование подчеркивает важную роль блокчейна в обеспечении прозрачности и прослеживаемости. С помощью блокчейна компании могут с беспрецедентной точностью отслеживать путь своих продуктов. Это особенно ценно в таких отраслях, как пищевая промышленность, фармацевтика и предметы роскоши, где подлинность и происхождение товаров имеют решающее значение.

Создавая неизгладимый цифровой след, блокчейн гарантирует, что потребители смогут легко проверить подлинность товаров и отследить их происхождение, что, в свою очередь, укрепляет доверие и лояльность покупателей.

Эффективность — это основа успешного управления цепочками поставок, и технология блокчейн продемонстрировала свою впечатляющую мощь в этой сфере. Автоматизируя процессы, уменьшая бумажную волокиту и оптимизируя управление запасами, блокчейн значительно упрощает операции, что приводит к значительной экономии средств и ускорению вывода продукции на рынок.

Способность технологии устранять посредников и снижать транзакционные издержки еще больше повышает эффективность, делая цепочки поставок более гибкими и способными реагировать на изменения рынка.

Несмотря на все преимущества технологии блокчейн, важно отметить и проблемы, которые необходимо преодолеть для ее широкого внедрения. Данные про-

блемы включают масштабируемость, взаимодействие и безопасность. Однако продолжающийся прогресс в развитии технологии и разработка отраслевых решений постепенно устраняют эти препятствия. По мере развития и совершенствования технологии, её преобразующий потенциал в управлении цепочками поставок станет ещё более очевидным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев М.Ю. Анализ рисков и возможностей применения технологии блокчейн в сфере логистики / М.Ю. Агеев, Е.В. Бабакова // Современная экономика: глобальные тренды и приоритеты устойчивого развития: Сборник научных трудов Национальной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 24 ноября 2022 года / Под общей редакцией Т.П. Сацук, Н.В. Дедюхиной. — Санкт-Петербург: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2022. — С. 169–172.
2. Бекмурзаев И.Д. Перспективы внедрения блокчейн-технологии в транспортную логистику / И.Д. Бекмурзаев, А.Х. Курбанов // ФГУ Science. — 2023. — № 4(32). — С. 9–13. — DOI 10.36684/37-2023-32-4-9-14.
3. Бобровник А.С. Инновационная технология «блокчейн» в логистике / А.С. Бобровник // Инновационная экономика и современный менеджмент. — 2021. — № 3(34). — С. 27–29.
4. Лозик Н.Ф. Использование блокчейн-технологий в логистике / Н.Ф. Лозик // Трансформация предпринимательской деятельности: новые технологии, эффективность, перспективы: материалы VIII Международного научного конгресса, Москва, 22–23 мая 2020 года / Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации. — Москва: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К», 2020. — С. 257–263.
5. Лукьянова А.С. применение технологии блокчейн в логистике / А.С. Лукьянова // Современные научные исследования: проблемы, тенденции, перспективы: сборник научных трудов по материалам XXII Международной научно-практической конференции, Анапа, 16 декабря 2023 года. — Анапа: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский центр экономических и социальных процессов» в Южном Федеральном округе, 2023. — С. 78–86.
6. Нгуен Д.А. Преимущества применения технологии блокчейн в логистике и управлении цепями поставок в Юго-Восточной Азии / Д.А. Нгуен // Цифровая трансформация промышленности: современные формы устойчивого развития: Сборник научных трудов по материалам 4-й Всероссийской научно-практической конференции, Москва, 09 ноября 2023 года. — Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Русайнс», 2023. — С. 490–497.
7. Никонова Я.И. Применение технологии блокчейн на транспорте и в логистике / Я.И. Никонова // Журнал монетарной экономики и менеджмента. — 2024. — № 2. — С. 43–47. — DOI 10.26118/2782–4586.2024.17.83.006.
8. Ныров А.В. Блокчейн-технологии в логистике / А.В. Ныров, А.О. Алейник // Студенческий вестник. — 2023. — № 26–3(265). — С. 65–66.
9. Тельжанов Б.Е. Цифровизация как тренд логистики / Б.Е. Тельжанов, Д.И. Васильев // Экономика и общество: современные исследования и инновационное развитие: Материалы всероссийской научно-практической конференции. В 3-х частях, Омск, 12–13 декабря 2023 года. — Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2023. — С. 94–99.

© Камышанов Денис Эдуардович (eldkkremgg@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В СОВРЕМЕННОЙ СИСТЕМЕ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ

APPLICATION OF INTELLIGENT DECISION SUPPORT SYSTEMS IN THE MODERN HEALTHCARE SYSTEM

D. Kamysanov

Summary. The results of the current level of scientific and technological progress are marked by the widespread integration of various information technologies. Various intelligent technologies are particularly relevant in this context. One of the significant areas in which there is an active development and integration of innovative technologies is medicine. The main purpose of this work is to perform a comprehensive analysis on the issue of the use of intelligent decision support systems in the modern healthcare system. The paper presents factors indicating a high level of relevance and the need to integrate intelligent technologies in medicine. Because of the work, the main features and possibilities of using intelligent decision support systems in the medical field are considered. The author systematizes the key advantages and shows the role of these systems in the modern healthcare system. The significance of the work lies in the development of a universal methodology for building intelligent decision support systems, the use of which can become a useful tool for solving problems in the healthcare system. A feature of the work is the possibility of using the presented materials as a justification for the need for digital development of modern medical organizations, as well as confirmation of the high level of importance of using intelligent decision support systems.

Keywords: information technology, artificial intelligence, healthcare, medicine, decision support system.

Камышанов Денис Эдуардович

Аспирант, Российская Академия
Народного Хозяйства и Государственной Службы
при Президенте Российской Федерации
eldkkremgg@gmail.com

Аннотация. Результаты текущего уровня научно-технического прогресса ознаменованы повсеместной интеграцией различных информационных технологий. Особенно актуальными в данном контексте являются различные интеллектуальные технологии. Одним из значимых направлений, в котором наблюдается активная разработка и интеграция инновационных технологий, является медицина. Основной целью настоящей работы является выполнение комплексного анализа относительно вопроса применения интеллектуальных систем поддержки принятия решений в современной системе здравоохранения. В работе представлены факторы, свидетельствующие о высоком уровне актуальности и необходимости интеграции интеллектуальных технологий в медицине. В результате работы рассмотрены основные особенности и возможности применения интеллектуальных систем поддержки принятия решений в медицинской сфере. Автором систематизированы ключевые преимущества и определена роль интеллектуальных систем в современной системе здравоохранения. Значимость работы заключается в разработке универсальной методики построения систем поддержки принятия решений, что может стать полезным инструментом для решения задач в здравоохранении. Особенностью работы является возможность использования представленных материалов для обоснования необходимости цифрового развития современных медицинских организаций. Также подчеркивается высокая значимость применения интеллектуальных систем поддержки принятия решений.

Ключевые слова: информационные технологии, искусственный интеллект, здравоохранение, медицина, система поддержки принятия решений.

Введение

Информационные технологии (далее — ИТ) стали неотъемлемой частью функционирования практически всех профессиональных сфер жизнедеятельности человека на момент 2024 года. Во многом это определяется возможностью существенного повышения качества и эффективности выполняемых операций, снижением влияния человеческого фактора, а также автоматизации операций. Система здравоохранения не является исключением [1]. В современных предприятиях (организациях) медицинской направленности происходит активная цифровая трансформация, направленная на улучшение качества и эффективности решения различных задач. Существенный вклад вносит разработка и использование решений на основе технологий искусственного интеллекта (далее — ИИ). ИИ при-

меняется для решения огромного множества задач, при этом особый интерес направлен именно в сторону развития интеллектуальных систем поддержки принятия решений (далее — СППР).

Данная динамика подтверждается результатами современных статистических исследований. Так, общий объем рынка ИТ-решений в современной системе здравоохранения оценивается в 360 миллиардов долларов на момент 2024 года. И, как ожидается, достигнет свыше 730 миллиардов долларов к 2030 году при среднегодовом темпе в 15 % (по данным исследовательского центра Mordor Intelligence). Период до 2030 года также обусловлен Концепцией «Цифровая трансформация 2030», разработанной во исполнение указов Президента Российской Федерации Путина В.В. о цифровом развитии общества на 2017–2030 годы [2]. В связи с этим, пер-

спективным направлениям развития интеллектуальных СППР в системе здравоохранения необходимо уделять значительное внимание со стороны бизнеса и государства. В рамках представленной работы решается круг задач, связанный с обоснованием необходимости и анализом основных возможностей применения СППР на в здравоохранении. Материалы работы могут стать основой в актуализации необходимости применения и разработке медицинских интеллектуальных СППР.

Результаты и обсуждение

Актуальность интеграции интеллектуальных технологий в здравоохранение в 2024 году обусловлена растущей потребностью в повышении качества и доступности медицинских услуг на фоне глобальных вызовов. Современное здравоохранение сталкивается с нарастающим спросом на медицинские услуги, что связано как с увеличением продолжительности жизни, так и с ростом численности населения [3]. В этих условиях традиционные методы диагностики и лечения становятся все менее эффективными. Интеллектуальные технологии, такие как искусственный интеллект, машинное обучение и большие данные, могут существенно повысить эффективность медицинских систем, сократить время на постановку диагноза и улучшить результаты лечения за счет персонализированного подхода к пациентам.

Необходимость применения таких технологий усиливается и в связи с развитием цифровых медицинских платформ и телемедицины. Внедрение интеллектуальных систем позволяет автоматизировать множество рутинных процессов, таких как анализ медицинских

данных, выявление патологий на ранних стадиях и даже предсказание вспышек заболеваний. В условиях нехватки медицинского персонала и необходимости быстрого реагирования на эпидемии или пандемии, такие решения становятся не просто дополнительным инструментом, а необходимым элементом функционирования медицинской системы [4]. Помимо этого, интеллектуальные технологии в медицине способствуют сокращению расходов на здравоохранение, что имеет важное значение для стран с ограниченными бюджетами. Автоматизация и оптимизация процессов позволяют снизить затраты на лечение и диагностику, минимизировать ошибки медицинского персонала и ускорить процессы принятия решений. Все это делает интеграцию интеллектуальных технологий в здравоохранение приоритетной задачей для стран по всему миру в 2024 году.

Одним из ключевых направлений развития ИТ в медицине становится создание интеллектуальных СППР. Данные системы представляют собой совокупность программных инструментов, которые на основе анализа огромного массива медицинских данных помогают врачам принимать более точные и информированные решения (рис. 1). В современных условиях, при которых информация о пациентах становится все более обширной и сложной для анализа, СППР играют важную роль в ускорении процессов диагностики и выбора оптимального плана лечения [5]. Они становятся важным связующим звеном между огромными объемами данных и эффективным применением этих данных на практике.

Как видно из рис. 1, работа интеллектуальной СППР начинается со сбора и интеграции данных, в который



Рис. 1. Обобщенная функциональная архитектура СППР

система агрегирует и структурирует всю необходимую информацию. Затем следует этап анализа, на котором применяются различные аналитические модели и алгоритмы для обработки данных и формирования прогностических сценариев [6]. На заключительном этапе система предоставляет результаты анализа в виде интерактивных отчетов, графиков и рекомендаций, которые пользователь может использовать для принятия обоснованных решений.

Основные особенности и возможности применения интеллектуальных СППР в медицинской сфере включают:

1. анализ данных в реальном времени — системы могут обрабатывать данные о пациентах, включая информацию из медицинских карт, результатов анализов и диагностических тестов в режиме реального времени, помогая врачам оперативно принимать решения;
2. повышение точности диагностики — за счет использования машинного обучения и искусственного интеллекта СППР могут распознавать сложные медицинские паттерны и заболевания на ранних стадиях, когда традиционные методы диагностики менее эффективны;
3. персонализированный подход к лечению — СППР могут адаптировать свои рекомендации с учетом индивидуальных особенностей пациента, таких как генетические данные, история болезней и образ жизни, что делает лечение более целенаправленным и эффективным;
4. снижение риска ошибок — интеллектуальные системы могут минимизировать человеческий фактор и помочь предотвратить ошибки в постановке диагноза или назначении лечения, что особенно важно в условиях высокой нагрузки на медицинский персонал;
5. поддержка в сложных клинических случаях — в ситуациях, требующих анализа множества факторов, СППР способны предложить оптимальные варианты лечения, основываясь на опыте тысяч других случаев, что помогает врачам принимать решения в сложных клинических ситуациях.

Как видно, интеллектуальные СППР становятся неотъемлемым элементом современной медицины, обеспечивая врачей инструментами для более точного и быстрого принятия решений, что в конечном итоге способствует улучшению результатов лечения пациентов и повышению общей эффективности медицинских систем [7]. В результате, интеллектуальные системы поддержки принятия решений решают широкий круг задач, способствуя повышению качества и эффективности предоставляемых медицинских услуг. Они играют ключевую роль в анализе и интерпретации медицинских данных, ускоряя процессы диагностики, лечения и профилак-

ки. СППР помогают врачам принимать обоснованные решения, основываясь на большом объеме медицинской информации, которую сложно обработать вручную. Эти системы не заменяют медицинских специалистов, а дополняют их знания и опыт, предоставляя точные и своевременные рекомендации.

СППР также способствуют более эффективному распределению ресурсов здравоохранения. Они могут предсказывать тенденции заболеваемости, оптимизировать маршруты пациентов, предлагать варианты лечения с наилучшей прогнозируемой эффективностью и минимизировать ошибки. Это особенно важно в условиях, когда системы здравоохранения сталкиваются с высокой нагрузкой и ограниченностью ресурсов, а пациенты требуют более персонализированного подхода. Так, СППР помогают не только улучшить исходы лечения, но и повысить общую эффективность работы медицинских учреждений. В табл. 1 отражены результаты авторского анализа применения СППР в системе здравоохранения и их влияния на рабочие процессы.

Основной проблемой создания и применения интеллектуальных систем поддержки принятия решений в здравоохранении является их неоднородность и широкий круг решаемых задач. СППР могут использоваться в различных областях медицины — от диагностики и выбора лечения до мониторинга пациентов и распределения ресурсов. Однако разнообразие клинических случаев, медицинских данных и требований к системам затрудняет их разработку и внедрение [8]. Для решения этой проблемы требуется универсализация подходов к проектированию и разработке СППР, что позволит создавать более гибкие и эффективные решения, способные адаптироваться к различным сценариям и требованиям. Так, автором предлагается следующая универсальная методика разработки интеллектуальных СППР для здравоохранения:

1 этап. Определение целей и задач разработки системы.

1.1. Подзадачи:

- анализ потребностей медицинского учреждения или системы здравоохранения;
- определение конкретных задач, которые СППР должна решать (диагностика, мониторинг, выбор лечения, распределение ресурсов и т.д.).

1.2. Варианты решения:

- проведение исследования и консультаций с медицинскими экспертами и IT-специалистами для формулировки целей;
- создание опросников для врачей и администраторов медицинских учреждений с целью выявления критических задач, которые требуют поддержки принятия решений.

Преимущества применения СППР в здравоохранении

№	Преимущество	Состав	Эффект
1	Ускорение процессов диагностики и лечения	Возможность быстрого анализа медицинских данных в режиме реального времени, интеграцию с системами хранения и обработки данных, такими как электронные медицинские карты	СППР позволяют значительно сократить время на диагностику и выбор терапии, что особенно важно при лечении острых состояний, требующих немедленного вмешательства. Врачи получают рекомендации мгновенно, что ускоряет процессы и улучшает прогнозы
2	Повышение точности медицинских решений	Использование алгоритмов машинного обучения и анализа больших данных для выявления скрытых закономерностей и паттернов заболеваний, а также предсказательных моделей	системы минимизируют риск человеческой ошибки при постановке диагноза, особенно в сложных и многосложных случаях, что приводит к повышению точности лечения и снижению вероятности медицинских ошибок
3	Персонализированный подход к лечению	Обработка индивидуальных данных пациентов, таких как генетическая информация, анамнез, образ жизни и другие факторы, влияющие на выбор терапии	Помогает врачам подбирать индивидуальные схемы лечения, что повышает эффективность терапии и снижает риск побочных эффектов, так как учитываются личные особенности каждого пациента
4	Оптимизация использования ресурсов здравоохранения	Планирование маршрутов пациентов, управление медицинскими ресурсами, такими как коечный фонд, распределение врачей и медсестер, а также медицинского оборудования	Эффективное распределение ресурсов помогает снизить нагрузку на больницы и клиники, оптимизировать процесс оказания медицинских услуг и обеспечить своевременное получение помощи пациентами
5	Поддержка в принятии решений в сложных клинических случаях	Доступ к базам данных о тысячах клинических случаев, медицинской литературе и рекомендациям, основанным на доказательной медицине	Врачи получают возможность принимать более обоснованные решения в трудных ситуациях, полагаясь на проверенные данные и алгоритмы, что повышает шансы на успешное лечение даже при сложных диагнозах
6	Мониторинг и профилактика заболеваний	Использование предсказательных моделей для выявления рисков развития заболеваний на ранних стадиях и мониторинг состояния здоровья пациентов	Помогают выявлять заболевания до появления симптомов, что способствует раннему началу лечения и снижению нагрузки на систему здравоохранения за счет профилактики и своевременной терапии

2 этап. Сбор и анализ данных.

2.1. Подзадачи:

- определение источников данных: электронные медицинские карты, результаты анализов, изображения, генетические данные и т.д.;
- обеспечение их полноты и достоверности для формирования базы данных.

2.2. Варианты решения:

- интеграция системы с существующими медицинскими информационными системами для получения данных;
- проверка и верификация данных с целью устранения дублирования и ошибок.

3 этап. Разработка архитектуры системы.

3.1. Подзадачи:

- определение функциональных модулей системы: модуль обработки данных, модуль аналитики, модуль рекомендаций, интерфейс для врачей и т.д.;
- построение системы на основе масштабируемой архитектуры.

3.2. Варианты решения:

- использование модульной архитектуры, которая позволит легко адаптировать систему под различные клинические задачи;
- применение облачных технологий для масштабируемости и обеспечения доступности данных в реальном времени.

4 этап. Разработка алгоритмов обработки и анализа данных.

4.1. Подзадачи:

- разработка алгоритмов машинного обучения для анализа медицинских данных и предсказания исходов лечения;
- разработка методов обработки изображений для автоматической диагностики (например, распознавание патологий на снимках).

4.2. Варианты решения:

- использование гибридных алгоритмов, сочетающих как обучаемые модели (нейронные сети), так и статистические методы;

— применение методов глубинного обучения для задач с изображениями, таких как компьютерная томография или рентген.

5 этап. Тестирование и валидация системы.

5.1. Подзадачи:

— проведение испытаний системы на реальных данных, симуляциях или ограниченных выборках пациентов;

— оценка точности системы, времени реакции и качества предоставляемых рекомендаций.

5.2. Варианты решения:

— создание пилотных проектов на базе медицинских учреждений для практического тестирования системы;

— использование других методов тестирования для оценки эффективности различных подходов в алгоритмах.

6 этап. Внедрение системы в медицинскую практику.

6.1. Подзадачи:

— обучение медицинского персонала работе с системой;

— интеграция системы в рабочие процессы клиник и больниц.

6.2. Варианты решения:

— организация курсов и тренингов для врачей и медицинских работников, чтобы повысить их готовность к использованию СППР;

— обеспечение поддержки в первые месяцы работы системы для снижения числа ошибок и повышения уровня доверия со стороны медицинского персонала.

7 этап. Мониторинг и оптимизация системы.

7.1. Подзадачи:

— постоянный сбор обратной связи от пользователей системы;

— анализ показателей эффективности работы системы и уровня удовлетворенности врачей и пациентов.

7.2. Варианты решения:

— внедрение системы автоматического обновления алгоритмов и регулярное тестирование новых версий на практике;

— использование данных мониторинга для оптимизации алгоритмов и улучшения интерфейсов системы.

Данная методика способна обеспечить целостный и структурированный подход к разработке СППР, способствующий созданию надежных и эффективных решений, способных решать широкий круг медицинских задач.

Заключение

Таким образом, основной целью представленной работы являлось выполнение комплексного анализа относительно вопроса применения интеллектуальных СППР в современной системе здравоохранения. В рамках статьи рассмотрены основные особенности и возможности применения интеллектуальных систем поддержки принятия решений в медицинской сфере. Автором систематизированы ключевые преимущества данных систем и показана их значимая роль в повышении качества и эффективности работы современной системы здравоохранения. Одним из важнейших результатов работы является разработка универсальной методики построения интеллектуальных СППР. Данная методика может стать полезным инструментом для решения различных задач в системе здравоохранения, предоставляя стандартизированный подход к проектированию и внедрению таких систем.

В заключение следует отметить, что интеллектуальные СППР являются неотъемлемой частью современной системы здравоохранения в 2024 году. Это обусловлено необходимостью решения широкого спектра задач — от ускорения процессов диагностики и лечения до оптимизации использования ресурсов и персонализированного подхода к пациентам. В современных условиях интеграция интеллектуальных СППР становится важным элементом поддержки врачей и медицинских учреждений. Данные системы позволяют повысить точность и скорость принятия решений, снизить риск медицинских ошибок и сделать здравоохранение более устойчивым и экономически эффективным. Интеллектуальные СППР, благодаря своей способности адаптироваться к различным клиническим задачам и предоставлять персонализированные рекомендации, становятся важнейшим компонентом медицины будущего.

ЛИТЕРАТУРА

1. Малинина Е.В., Дубинкин В.А., Маркова Н.Ю., Кичко И.С. Применение цифровых технологий в практическом здравоохранении // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2024. №2. С. 17–20.
2. Демкина А.Е. Эволюция цифровой медицины. мировой и отечественный опыт // Вестник Московского университета. Серия 21. Управление (государство и общество). 2023. №2. С. 3–26.
3. Адылова Ф.Т. Успехи искусственного интеллекта в здравоохранении в 2023 году и прогноз на 2024 год: аналитика мировых трендов // Raqamli iqtisodiyot (Цифровая экономика). 2024. №7. С. 462–470.
4. Пирлиев К., Нурмаммедова О., Азадов А. Технологии искусственного интеллекта в медицине: применение и использование в современной медицине // Вестник науки. 2024. №1 (70). С. 704–709.
5. Алмазов А.А., Румянцев П.О., Купреев П.П., Мурашко М.М., Родин С.А., Мелерзанов А.В. Системы поддержки принятия врачебных решений; анализ мульти-модальных данных, разница «человеческого» и «машинного» подходов, социальная проблематика сбора и оборота биомедицинских данных // Врач и информационные технологии. 2020. №2. С. 28–35.
6. Урманцева Н.Р., Курамшина А.В. Система поддержки принятия решений в медицине: подходы и методы применения во флебологии // ВК. 2022. №3 (47). С. 66–74.
7. Фролов С.В., Куликов А.Ю., Остапенко О.А., Стрыгина Е.В. Системы поддержки врачебных решений в медицине // Научный журнал. 2018. №9 (32). С. 9–16.
8. Кобринский Б.А. Системы поддержки принятия врачебных решений: история и современные решения // Методология и технология непрерывного профессионального образования. 2020. №4 (4). С. 22–38.

© Камышанов Денис Эдуардович (eldkkremgg@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

АСИНХРОННЫЙ РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНЫЙ АЛГОРИТМ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В УСЛОВИЯХ ОТСУТСТВИЯ СИГНАЛОВ ГЛОБАЛЬНОЙ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

ASYNCHRONOUS DIFFERENTIAL-RANGE ALGORITHM FOR POSITIONING AN UNMANNED AERIAL VEHICLE IN THE ABSENCE OF GLOBAL SATELLITE NAVIGATION SYSTEM SIGNALS

V. Kopyltsov

Summary. The paper considers the problem of positioning a UAV performing a target task in conditions of GNSS signal suppression. The source of the navigation signal, which is a sequence of pulses, is a navigation object (UAV), which transmits this signal to reference points for estimating the pulse arrival time and then determining the coordinates of the navigation object. As a positioning method, an asynchronous differential-range method is analyzed, the essence of which is to find the differences in the pulse arrival time between N reference points and their shifted, for the pulse repetition interval, copies. Modeling has shown the efficiency of the proposed approach for determining the coordinates of the UAV.

Keywords: local navigation systems, asynchronous total-range method, radiotechnical control, determination of UAV coordinates.

Копыльцов Владимир Юрьевич

Заместитель генерального конструктора,
начальник направления, ООО «Специальный
технологический центр» г. Санкт-Петербург
vkopyltcov@yandex.ru

Аннотация. В работе рассмотрена задача позиционирования БЛА, выполняющий целевую задачу в условиях подавления сигналов ГНСС. Источником навигационного сигнала, представляющий собой последовательность импульсов, является объект навигации (БЛА), который передает данный сигнал на опорные пункты для оценивания времени прихода импульсов и последующего определения координат объекта навигации. В качестве метода позиционирования анализируется асинхронный разностно-дальномерный метод, суть которого состоит в нахождении разностей времени прихода импульсов между N опорными пунктами и их смещенными, за интервал следования импульсов, копиями. Моделирование показало работоспособность предложенного подхода для определения координат БЛА.

Ключевые слова: локальные навигационные системы, асинхронный суммарно-дальномерный метод, радиотехнический контроль, определение координат БЛА.

Введение

В последние годы широкое распространение получают автономные беспилотные летательные аппараты (БЛА), способные функционировать длительное время в неопределенной и изменяемой обстановке в соответствии с поставленной целевой задачей [1]. Эффективность выполнения целевой задачи в определяющей степени зависит от работы навигационной системы. Большинство существующих систем позиционирования обеспечивают достаточную точность определения положения и ориентации аппарата при устойчивой работе глобальной спутниковой навигационной системы (ГНСС). Однако, при отсутствии сигналов ГНСС, ошибки позиционирования объекта навигации могут оказаться недопустимыми. Поэтому, одним из важных направлений модернизации бортового оборудования малоразмерных БЛА является разработка локальной навигационной системы (ЛНС), обеспечивающих полет в условиях отсутствия сигналов ГНСС.

Сегодня актуален ряд разработок ЛНС, среди которых следует отметить систему DeckFinder [2] фирмы Astrum и отечественный проект «Псевдоспутник» [3]. Обе системы позиционируются как высокоточные системы навигации, позволяющие преодолеть основные проблемы, связанные с применением ГНСС, в частности, уязвимость для средств радиоэлектронной борьбы, невозможность применения в закрытых помещениях и условиях плотной застройки, а также недостаточная точность для решения ряда задач, например, для автоматизации посадки летательных аппаратов. При этом, по информации фирм разработчиков, упомянутые системы ЛНС позволяют достичь чрезвычайно высокой точности локализации объектов, вплоть до единиц сантиметров. Однако, подобная точность достижима только в сравнительно малой области пространства — в непосредственной близости от наземных опорных пунктов (ОП), составляющих основу данных систем. Так, для системы DeckFinder дальность действия составляет 1.1 км, а расчет точности системы «Псевдоспутник» предпола-

гает, что объект навигации находится в пределах квадрата 10×10 км, фактически внутри области расположения пунктов ЛНС [3].

Математические выражения для определения погрешности местоположения БЛА прямо связаны с относительной точностью взятия временных отсчетов распределенных сегментов ЛНС, а для достижения потенциальных характеристик методов расчета координат объекта навигации критерии точности синхронизации должны быть однозначно сформулированы и безусловно обеспечены [4–6].

Сложность практической реализации схем синхронизации высокой точности, отсутствие глубоко изученных и общепризнанных методов синхронизации и передачи данных в ЛНС ограничивают их развитие или накладывают ограничения на использование возможностей систем с разнесенными позициями в полной мере. Практически достигнутые результаты временной синхронизации и передачи данных разнесенных позиций в известной литературе подробно не описаны, известные технические решения реализуются, как правило, только на стационарно развернутых каналах передачи данных и синхронизации. Возможности достижения теоретически рассчитываемой потенциальной точности измерений в многопозиционных системах, основанные в том числе на альтернативных методах расчета пространственных координат и обеспечения синхронизации [7–9], в широкой практике не применяются, но безусловно должны быть проанализированы в перспективе.

В данной работе рассматривается возможность применение асинхронного разностно-дальномерного метода (РДМ), в качестве основы для построения ЛНС на значительном удалении от области расположения ОП этой системы для решения таких задач, как, например, выполнение разведки с помощью БЛА. Для решения подобных задач не требуется сантиметровой точности локализации объектов в пространстве, но чрезвычайно актуально требование защищенности системы от средств радиоэлектронного противодействия, что фактически не позволяет использовать ГНСС.

Таким образом, целью данной статьи является анализ и оценка точности навигации в локальном информационно-навигационном поле с использованием асинхронного РДМ.

Постановка задачи

Пусть шкалы времени в ОП и БЛА независимы. Часы в i -м узле (ОП) стартуют в некоторый неизвестный момент времени Ω_i . Здесь мы используем индекс i для обозначения как ОП ($i = 1, 2, \dots, N$) (так и БЛА ($i = 0$)). Частота часов F_i исследуемой ЛНС имеет некоторый неизвест-

ный незначительный частотный сдвиг ε_i , относительно частоты F_s известных номинальных часов

$$F_i = F_s(1 - \varepsilon_i), \tag{1}$$

где ε_i — случайная величина, распределенная по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ^2 . Типичный диапазон этой величины составляет от 10^{-6} – 10^{-4} [10]. Так как все часы ЛНС независимы, каждый ОП имеет свою локальную шкалу времени t_i , которая определяется отсчетами моментов прихода импульсов, излученных БЛА.

Шкалу времени t_i можно представить в секундах через линейную зависимость с глобальным временем t

$$t_i = \Omega_i + I_i T_i = \Omega_i + I_i T_s \frac{1}{(1 - \varepsilon_i)} \approx \Omega_i + I_i T_s (1 + \varepsilon_i), \tag{2}$$

где $T_i = 1 / F_i$ — длительность временного интервала, $\{\varepsilon_i\}_{i=0}^N, \{\Omega_i\}_{i=0}^N$ — неизвестные параметры синхронизации.

В формуле (2) применена аппроксимация Тейлора путем отбрасывания малых по значению членов второго и старшего порядков величины ε_i .

БЛА периодически излучает импульсный сигнал $s(t)$ с известной структурой и постоянной скоростью c . Импульсы излучаются источником в локальные моменты времени $l_0 = \{pL\}_{p=0}^\infty$, где p — индекс импульса, а L — между импульсный интервал, значение которого известно.

Также известен ожидаемый период следования импульсов LT_s . Здесь, как и ранее величина L представлена как число дискрет на оси времени, а LT_s — в секундах. Следует заметить, что мгновенные значения $LT_s(1 + \varepsilon_0)$ неизвестны.

Местоположение БЛА может быть определено только в моменты излучения им импульсов. Это означает, что происходит семплирование траектории полета БЛА $x_0(t)$ со скоростью $\frac{1}{T_s(1 + \varepsilon_0)}$, что дает дискретную последовательность координат источника. С учетом формулы (2) эту последовательность можно выразить через глобальное время в виде выражения

$$\{\mathbf{x}(pLT_s(1 + \varepsilon_0) + \Omega_0)\}_{p=0}^\infty, \tag{3}$$

которое в дальнейшем будем обозначать так $\{\mathbf{x}(p)\}_{p=0}^\infty$.

Каждый ОП ЛНС оценивает время прихода импульсного сигнала БЛА, основываясь на его минимальной

единице времени (такте). На i -ом ОП оценка времени прихода p -го импульса можно выразить так

$$\hat{l}_i(p) = l_i(p) + n_i(p), \quad (4)$$

где $l_i(p)$ — истинное значение ВПИ на i -ой шкале времени, $n_i(p)$ — ошибка оценки ВПИ, которая полагается случайной величиной с нормальным распределением вида $n_i \sim N(0, \sigma_n^2)$.

Каждый ОП передает на центральный пункт (ЦП) короткое сообщение включающее в себя индекс i , оценку ВПИ и индекс p . Задача ЦП заключается в определении места БЛА $\{\mathbf{x}(p)\}_{p=0}^\infty$ основываясь на множестве наблюдений $\{\hat{l}_i(p)\}_{p=0}^\infty, i = 1, 2, \dots, N$.

Для того чтобы индекс импульса соответствовал оценке его ВПИ, шкалы времени ОП должны быть выровнены. Это можно легко достигнуть путем вставки специального импульса в начале излучения объекта наблюдения (при старте) ОП обнаруживают специальный импульс и могут потом анализировать следующие импульсы синхронно.

Рисунок 1 иллюстрирует временные соотношения для двух последовательных импульсов p и $p+1$.

Импульс p излучается БЛА в момент времени $l_0(p) = pL$, которое соответствует глобальному времени $t_0(p) = pLT_s(1 + \varepsilon_0) + \Omega_0$.

Время распространения до i -го ОП есть $\frac{\|x_0(p) - x_i\|}{c}$, а момент прихода по глобальному времени равен $t_i(p) = \frac{\|x_0(p) - x_i\|}{c} + pLT_s(1 + \varepsilon_0) + \Omega_0$, где c — скорость света. Это время может быть преобразовано к локальному времени i -го узла ЛНС используя выражение (2), оценку которого $\hat{l}_i(p)$ дает выражение (4). Таким образом, локальная оценка ВПИ связана с позицией БЛА так

$$\begin{aligned} \hat{l}_i(p) &= \frac{\|x_0(p) - x_i\|}{cT_s(1 + \varepsilon_i)} + pL \frac{1 + \varepsilon_0}{1 + \varepsilon_i} + n_i(p) \\ a) \quad &\approx \frac{\|x_0(p) - x_i\|}{cT_s}(1 - \varepsilon_i) + pL(1 + \varepsilon_0 - \varepsilon_i) + \\ &+ \frac{\Omega_0 - \Omega_i}{T_s}(1 - \varepsilon_i) + n_i(p) \\ b) \quad &\approx \frac{\|x_0(p) - x_i\|}{cT_s} + pL(1 + \varepsilon_0 - \varepsilon_i) + \frac{\Omega_0 - \Omega_i}{T_s} + n_i(p). \end{aligned} \quad (5)$$

В формуле (5) промежуточные результаты (а) и (б) по аналогии с (2) получены с использованием аппроксимации Тейлора, с той разницей, что при выводе (б) были отброшены первый и третий члены величины ε_i , поскольку они не оказывают существенного влияния на конечный результат.

Разность времени прихода сигнала на i -й и j -й узлы может быть вычислена используя (5) так

$$\begin{aligned} \hat{l}_i(p) - \hat{l}_j(p) &= \frac{\|x_0(p) - x_i\| - \|x_0(p) - x_j\|}{cT_s} + \\ &+ pL(\varepsilon_j - \varepsilon_i) + \frac{\Omega_j - \Omega_i}{T_s} + n_i(p) - n_j(p) \end{aligned} \quad (6)$$

Из выражения (6) можно видеть, что данные оценки отличаются от истинных на величину двух дополнительных слагаемых (второго и третьего). Второе слагаемое представляет собой суммарную ошибку, вызванную различными частотными смещениями, в то время как третье слагаемое есть ошибка, вызванная различными временными смещениями. Второе слагаемое не является пренебрежимо малым, так как число p может быть неограниченным, а третье слагаемое, также может быть значительным из-за существенной разности между Ω_i и Ω_j .

Из этого следует, что оценка временной разности между двумя асинхронными ОП, вычисленная по формуле (6) не является достоверной. Далее опишем подход, который позволяет вычислять временную разность между двумя последовательными импульсами, принятыми на одном ОП.

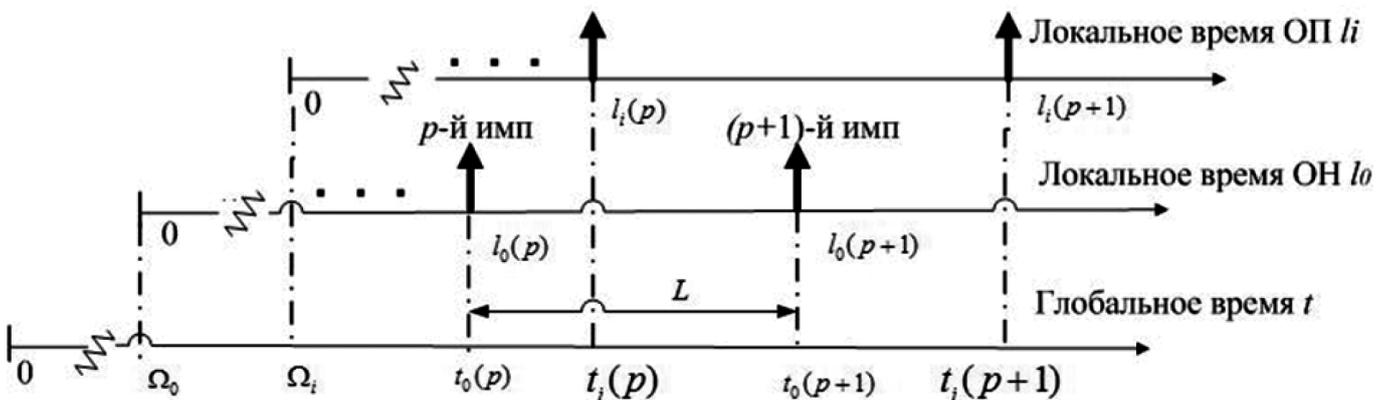


Рис. 1. Временные соотношения двух последовательных импульсов, излученных объектом навигации

Описание асинхронного разностно-дальномерного алгоритма позиционирования воздушного объекта навигации

Выражение, описывающее разность времени прихода двух принятых импульсов на i -м ОП, можно представить так

$$\hat{l}_i(p+1) - \hat{l}_i(p) = \frac{\|\mathbf{x}_0(p+1)\| - \|\mathbf{x}_0(p) - \mathbf{x}_i\|}{cT_s} + L(\varepsilon_0 - \varepsilon_i + 1) + n_i(p+1) - n_i(p) \quad (7)$$

Если вычесть L из обеих сторон (7) и определить $y_i(p) \triangleq \hat{l}_i(p+1) - \hat{l}_i(p) - L$, то получим

$$\begin{aligned} y_i(p) &= \frac{\|\mathbf{x}_0(p+1) - \mathbf{x}_i\| - \|\mathbf{x}_0(p) - \mathbf{x}_i\|}{cT_s} + \\ &+ L(\varepsilon_0 - \varepsilon_i) + n_i(p+1) - n_i(p) = \\ &= \frac{\|\mathbf{x}_0(p) + \mathbf{d}(p) - \mathbf{x}_i\| - \|\mathbf{x}_0(p) - \mathbf{x}_i\|}{cT_s} + e_i(p) = \\ &= f_i(\mathbf{x}_0(p), \mathbf{d}(p)) + e_i(p) \end{aligned} \quad (8)$$

где $\mathbf{d}(p) = \mathbf{x}_0(p+1) - \mathbf{x}_0(p)$ перемещение БЛА за время, равное интервалу следования импульсов p и $p+1$, а $f_i(\mathbf{x}_0, \mathbf{d}) = (\|\mathbf{x}_0 + \mathbf{d} - \mathbf{x}_i\| - \|\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_i\|) / cT_s$ — детерминированная функция места БЛА и вектора перемещения. Величина $e_i(p) = L(\varepsilon_0 - \varepsilon_i) + n_i(p+1) - n_i(p)$ — есть реальный шум, распределенный по нормальному закону вида $e_i(p) \sim N(0, 2(L^2\sigma_\varepsilon^2 + \sigma_n^2))$ и включающий в себя погрешности оценки измеряемого параметра и частотного смещение. Можно видеть, что здесь слагаемое, характеризующее ошибку временного смещения $(\Omega_j - \Omega_i) / T_s$ (см. формулу (6) отсутствует, а ошибки, вызванные частотным смещением $pL(\varepsilon_j - \varepsilon_i)$ сведены к величине $L(\varepsilon_0 - \varepsilon_i)$ и теперь являются ограниченными. По этой причине можно трактовать небольшое частотное смещение в (8) как дополнительную ошибку.

Временную оценку разности между последовательными импульсами, вычисленную N приемными узлами ЛНС, можно представить в форме N размерного уравнения

$$\mathbf{y} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_0, \mathbf{d}) + \mathbf{e}, \quad (9)$$

где \mathbf{e} — случайный гауссовский вектор с нулевым математическим ожиданием и ковариационной матрицей $\mathbf{Q} = E[\mathbf{e}\mathbf{e}^T] = \sigma_0^2 \mathbf{I}_N$. Здесь σ_0^2 — дисперсия шума, которая равна $2(L^2\sigma_\varepsilon^2 + \sigma_n^2)$. Мы упустили здесь индекс импульса p ради упрощения.

Дадим геометрическую интерпретацию рассмотренного выше подхода путем определения $\mathbf{x}'_i(p) \triangleq \mathbf{x}_i(p) - \mathbf{d}(p)$ и переписав формулу для $f_i(\mathbf{x}_0, \mathbf{d})$ в виде

$$f_i(\mathbf{x}_0, \mathbf{d}) = \frac{\|\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_i\| - \|\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}'_i\|}{cT_s}. \quad (10)$$

Выражение (10) аналогично выражению, которое используется в РДС [5], где линией положения является гиперболой, в фокусах которой находятся ОП с координатами $\mathbf{x}'_i, \mathbf{x}_i$, где \mathbf{x}'_i — координаты виртуального ОП, который смещен по отношению к реальному на расстояние $-\mathbf{d}(p)$ вследствие перемещения БЛА за время излучения двух последовательных импульсов p и $p+1$. В дальнейшем будем называть ОП и его смещенную копию виртуальной парой, рисунок 2.

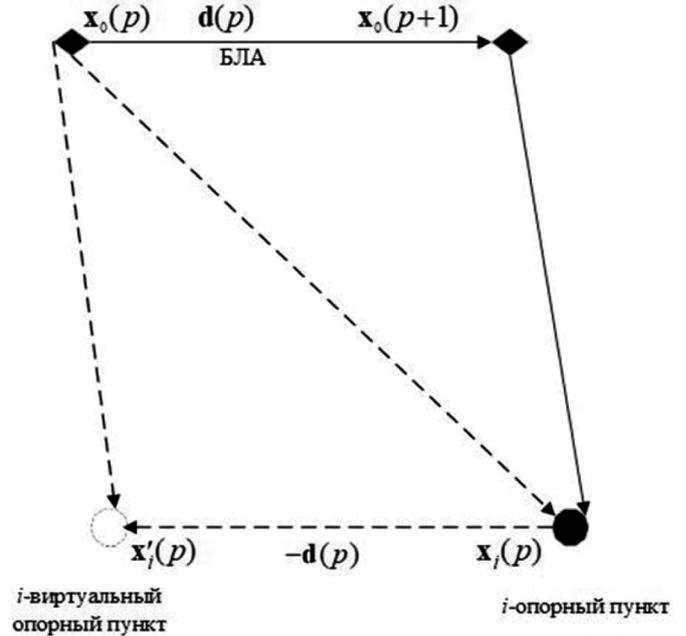


Рис. 2. Схематичное изображение виртуальной пары ОП

Заметим, что виртуальная пара имеет одну и ту же шкалу времени.

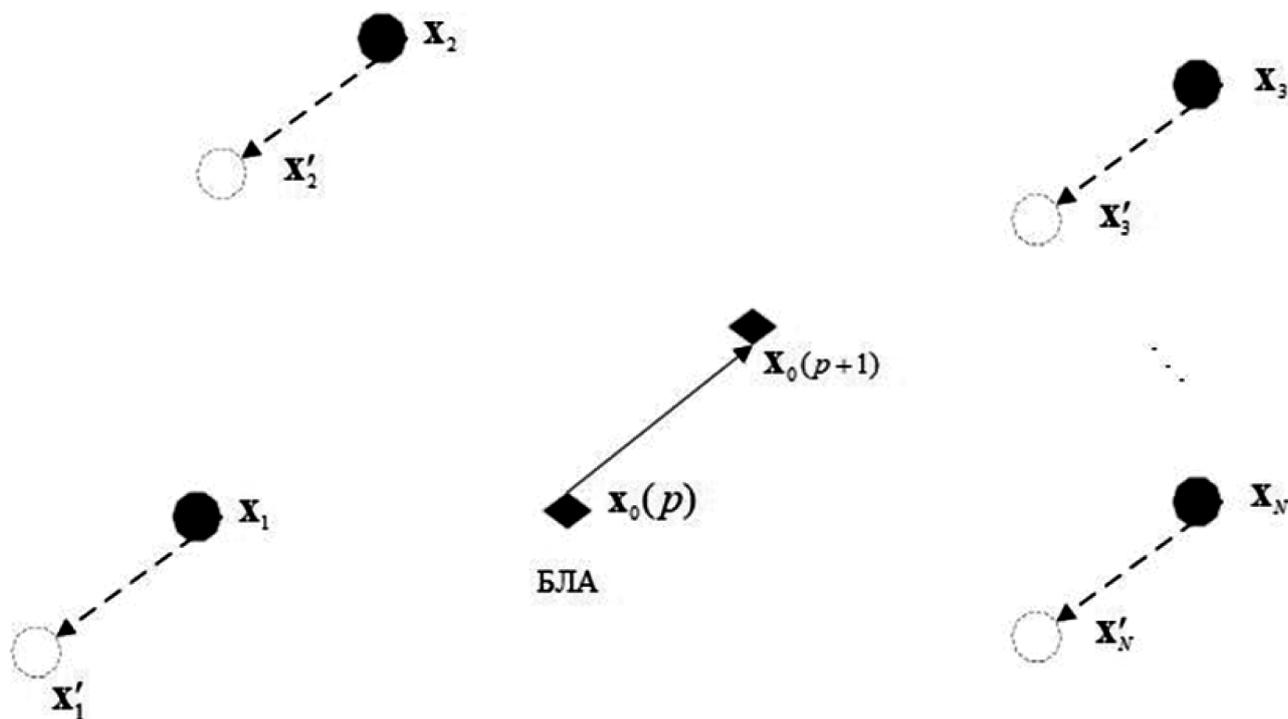
Временная разность (7) может быть вычислена с высокой достоверностью. Она может быть интерпретирована как разность, вычисленная виртуальной парой при приеме одного импульса.

С учетом выше сказанного, асинхронная ЛНС может быть представлена как множество N полностью синхронизированных виртуальных пар ОП с одинаковым, но неизвестным вектором смещения $-\mathbf{d}(p)$, рисунок 3.

Тогда задача позиционирования БЛА может быть представлена как совместное оценивание места источника и вектора смещения \mathbf{d} . Эту оценку можно выразить через один векторный параметр

$$\boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_0 \\ \mathbf{d} \end{bmatrix}, \boldsymbol{\theta} \in \mathbb{R}^{2D}.$$

Функцию правдоподобия для вектора наблюдаемых данных можно выразить так



Виртуальная пара

Рис. 3. Представление ЛНС в виде множества синхронизированных виртуальных пар

$$p(y; \cdot) = \frac{1}{(2\pi)^{N/2} |\mathbf{Q}|^{1/2}} \exp\{-1 / 2[y - \mathbf{f}(\mathbf{Q})]^T \mathbf{Q}^{-1} [y - \mathbf{f}(\mathbf{Q})]\}$$

где знак $|\cdot|$ означает детерминант матрицы.

Согласно методу максимального правдоподобия в качестве оценки неизвестного параметра θ принимается такое значение, которое минимизирует следующее выражение

$$\hat{\theta}_{\text{ММП}} = \underset{\theta}{\operatorname{argmin}} [y - \mathbf{f}(\mathbf{Q})]^T \mathbf{Q}^{-1} [y - \mathbf{f}(\theta)]. \quad (11)$$

Поскольку $f(\cdot)$ есть нелинейная функция измеряемого вектора параметра θ , решение (11) может быть найдено путем ее линеаризации с помощью разложения в ряд Тейлора, используя только первые два члена, в окрестности начальной гипотезы $\hat{\theta}_0$, для истинного вектора параметров [11]. Отсюда имеем

$$\mathbf{f}(\theta) \approx \mathbf{f}(\hat{\theta}_0) + \mathbf{G}(\hat{\theta}_0)(\theta - \theta_0), \quad (12)$$

где $\mathbf{G}(\hat{\theta}_0) = \nabla_{\theta} \mathbf{f}(\theta) |_{\theta=\hat{\theta}_0}$ — градиент функции $\mathbf{f}(\cdot)$ вычисленной при $\theta = \hat{\theta}_0$

Решая (11) (2.63) с использованием (12) получим

$$\hat{\theta} = \hat{\theta}_0 + \left(\mathbf{G}^T(\hat{\theta}_0) \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{G}(\hat{\theta}_0) \right)^{-1} \mathbf{G}^T(\hat{\theta}_0) \mathbf{Q}^{-1} (y - \mathbf{f}(\hat{\theta}_0)). \quad (13)$$

Начальная гипотеза $\hat{\theta}_0$, близкая к истинному решению, обычно не доступна, тогда (13) решается многократно согласно следующей формуле градиентного спуска

$$\hat{\theta}_{k+1} = \hat{\theta}_k + \left(\mathbf{G}^T(\hat{\theta}_k) \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{G}(\hat{\theta}_k) \right)^{-1} \mathbf{G}^T(\hat{\theta}_k) \mathbf{Q}^{-1} (y - \mathbf{f}(\hat{\theta}_k)), \quad (14)$$

где $\hat{\theta}_k$ есть решение на k -ой итерации. Однако следует учитывать возможность при расчете по формуле (14) попадание в локальный минимум из за нелинейности функции $\mathbf{f}(\theta)$. Более общий метод поиска оценки $\hat{\theta}_{\text{ММП}}$ описан в [12]. Однако для случая движущегося источника, где оценка предыдущей позиции принимается в качестве начальной гипотезы, итеративный метод градиентного спуска может быть принят за основу.

Согласно выражению (9) имеется N уравнений с $2D$ неизвестными, из чего следует что необходимое число ОП должно быть не менее чем $2D$, а матрица $\mathbf{G}^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{G}$ должна иметь полный ранг.

Таким образом, вектор параметров $\hat{\theta}(p) = [\hat{\mathbf{x}}_0(p)^T, \hat{\mathbf{d}}(p)^T]^T$ вычисляется в момент прихода каждого импульса p с использованием процедуры (14), которая использует предыдущую оценку $\hat{\theta}(p - 1)$ как начальную гипотезу, рисунок 4.

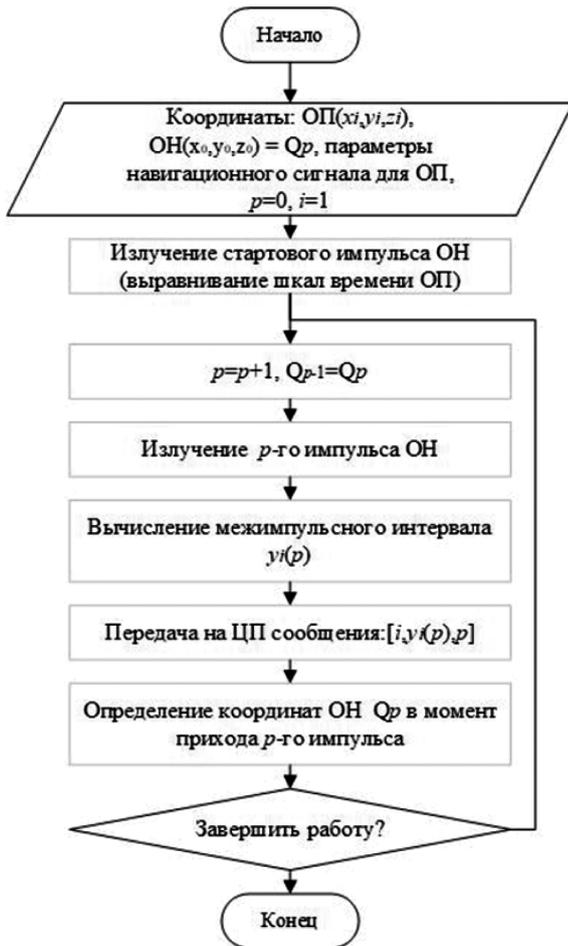


Рис. 4. Блок схема алгоритма позиционирования БЛА с использованием асинхронного РДМ

Оценка качества позиционирования БЛА с использованием предложенного алгоритма проводилась на программной модели ЛНС, состоящей из шести ОП с известными координатами и разным смещением $|d|$.

При расстоянии 5 км между ОП и смещении $|d|=500$ м точность позиционирования БЛА составила не хуже 40 м на дальности 10 км и не хуже 60 м на дальности 20 км, рисунок 5.

При аналогичной топологии ЛНС и смещении $d=1000$ м точность позиционирования составила не хуже 40 м на дальности 20 км и не хуже 30 м на дальности 10 км, рисунок 6. При этом полагалось, что ошибки позиционирования ОП отсутствовали.

Заключение.

Моделирование показало работоспособность ЛНС, состоящей из N независимых ОП, для определения координат БЛА асинхронным разностно-дальномерным способом с приемлемой точностью при решении целевой задачи на удалении от сети ОП на расстояние 10–20 км.

Применение одной сети передачи навигационного сигнала от ОН к ОП в совокупности с использованием РДС, не требующего синхронизацию ОП позволяет обеспечить высокую радио-защищенность от средств радиоэлектронной разведки. Расчет координат ОН выполняется на ЦП, что исключает несанкционированный доступ в ЛНС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Полтавский А.В., Маклаков В.В. Системные принципы создания и применения многоцелевых комплексов беспилотных летательных аппаратов/ Научное издание. — М.: ИПУ РАН, 2010. — 102 с.
2. Deckfinder [Reliability when you need it most [сайт]. URL: <http://deckfinder.net> (дата обращения: 28.03.2015).
3. ВедаПроект [сайт]. URL: <http://www.vedapro.ru/pseudo.php> (дата обращения: 28.03.2015).
4. J. O. Smith and J. S. Abel, "Closed form least-squares source location estimation from range-difference measurements," IEEE Transactions on Acoust., Speech, Signal Processing, vol. ASSP-35, no. 12, pp. 1661–1669, December 1987.
5. Y. T. Chan and K. S. Ho, "A Simple and Efficient Estimator for Hyperbolic Location," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 42, no. 8, pp. 1905–1915, August 1994.
6. Y. Wang, X. Ma, and G. Leus, "Robust time-based localization for asynchronous networks," IEEE Trans. Signal Process., pp. 4397–4410, Sept 2011.
7. Кирюшкин В.В. Определение координат воздушного судна в полуактивной системе мультilaterации с синхронизацией приемных позиций по запро-сному сигналу / В.В. Кирюшкин, Н.С. Волков, А.М. Медведев // Информационно-измерительные и управляющие системы. — 2019. — № 2. — С. 24–32.
8. High-Precision Synchronized Pulse Generation for Mobile Multistatic Radar System / Zhu Li-Chen, Zhao ChenNing, Guo Qing-Zi, Bu Xiang-Yuan // Advances in Computer Science Research. — 2017. — Vol. 44. — P. 458–463.
9. Крючков И.В. Синхронизация подвижных модулей распределенных радиолокационных комплексов / И.В. Крючков, А.А. Филатов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Приборостроение. — 2012. — С. 45.
10. J. R. Vig, "Introduction to Quartz Frequency Standards," SLCESTR-92-1 (rev. 1), Army Research Laboratory, Electronic and Power Sources Directorate, Fort Monmouth, NJ, at <http://www.ieeeuffc.org/freqcontrol/quartz/vig/vigtoc.htm>, October 1992.
11. D. J. Torrieri, "Statistical theory of passive location systems," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. AES-20, pp. 183–198, March 1989.
12. Y. T. Chan and J. J. Towers, "Sequential Localization of a Radiating Source by Doppler-Shifted Frequency Measurements," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 28, no. 4, pp. 183–198, October 1992.

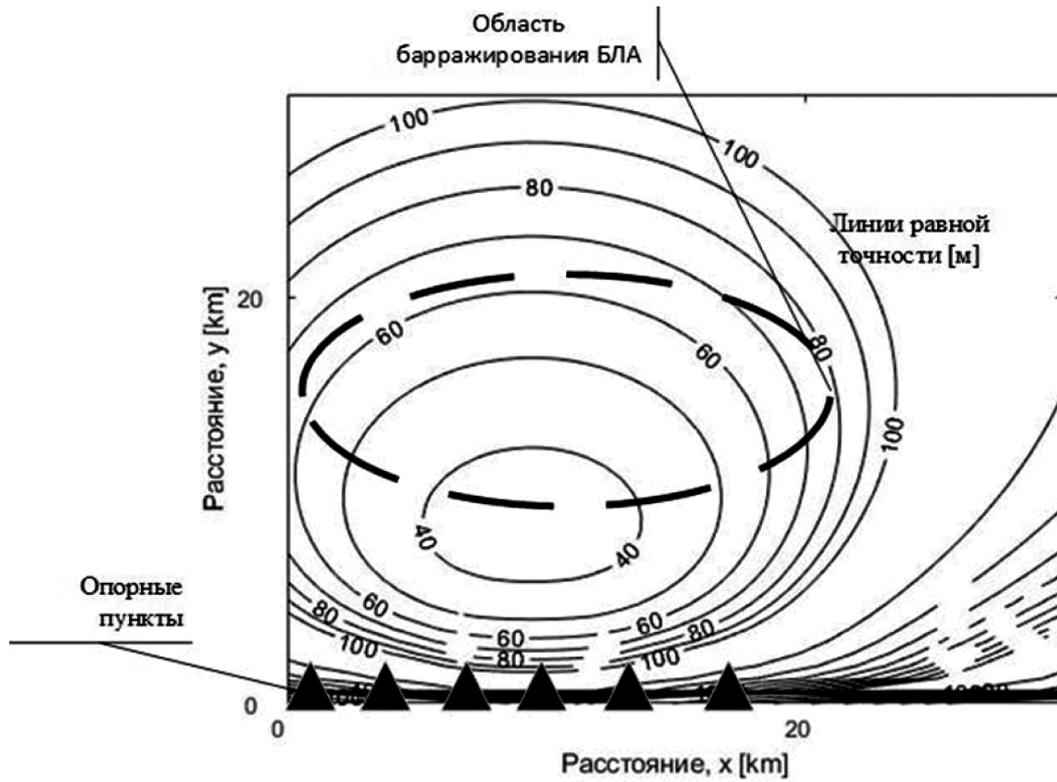


Рис. 5. Схематичное изображение ЛНС и линий равной точности при смещении $|d|=500$ м

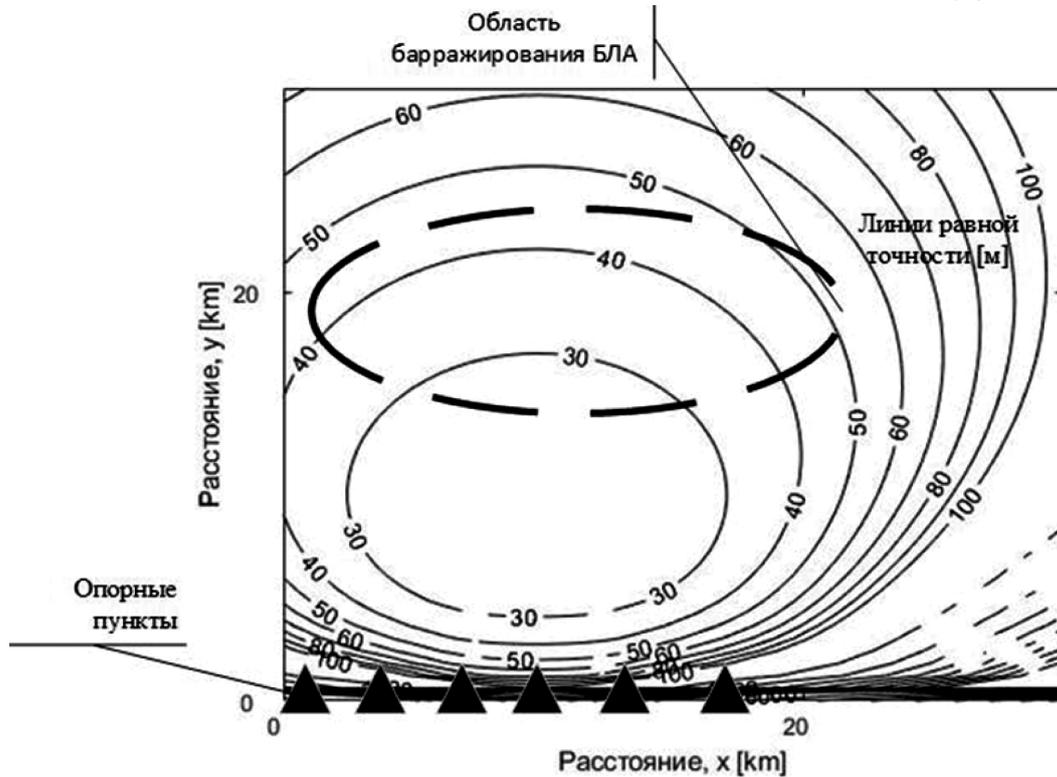


Рис. 6. Схематичное изображение ЛНС и линий равной точности при смещении $d=1000$ м

СУММАРНО-ДАЛЬНОМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСА РАДИОТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ НА БАЗЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Копыльцов Владимир Юрьевич

Заместитель генерального конструктора,
начальник направления, ООО «Специальный
технологический центр» г. Санкт-Петербург
vkopylcv@yandex.ru

TOTAL-RANGE-MEASURING MODEL OF POSITIONING A RADIO-TECHNICAL CONTROL COMPLEX BASED ON UNMANNED AERIAL VEHICLES

V. Kopyltsov

Summary. The paper considers the problem of ensuring navigation of a radio-technical control complex based on unmanned aerial vehicles (UAVs) using a total-range-measuring local navigation system. A combined positioning algorithm has been developed that does not require synchronization of reference transceiver points. The metric of calculating the lower bound of Cramer-Rao is proposed as an assessment of the quality of this algorithm. It has been established that the accuracy of determining the coordinates of the UAV using the proposed local positioning model depends on the number and spatial arrangement of reference transceiver points, as well as on the accuracy of determining the moments of time of receiving navigation signals. Computer modeling of the proposed algorithm has been carried out, which confirmed the operability and required accuracy of the developed LNS.

Keywords: local navigation systems, asynchronous differential-range measurement method, radiotechnical control, determination of UAV coordinates.

Аннотация. В работе рассмотрена задача обеспечения навигации комплекса радиотехнического контроля на базе беспилотных летательных аппаратов (БЛА) при помощи суммарно-дальномерной локальной навигационной системы. Разработан комбинированный алгоритм позиционирования, не требующий синхронизации опорных приемопередающих пунктов. В качестве оценки качества данного алгоритма предложена метрика вычисления нижней границы Крамера-Рао. Установлено, что точность определения координат БЛА с использованием предложенной модели локального позиционирования зависит от числа и пространственного размещения опорных приемопередающих пунктов, а также от точности определения моментов времени получения навигационных сигналов. Проведено компьютерное моделирование предложенного алгоритма, который подтвердил работоспособность и необходимую точность разрабатываемой ЛНС.

Ключевые слова: локальные навигационные системы, асинхронный разностно-дальномерный метод, радиотехнический контроль, определение координат БЛА.

Введение

С развитием современных технологий как в военной, так и в гражданской сфере все чаще находят применение беспилотные летательные аппараты БЛА для выполнения различных задач, в том числе радиотехнического контроля РТК [1]. В результате особую актуальность приобретает задача определения местоположения БЛА. В настоящее время определение координат объектов осуществляют на основе сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), таких как ГЛОНАСС, GPS, Galileo и др. [2]. Они имеют развитую инфраструктуру, могут использоваться в любой точке Земли и доступны гражданским потребителям. Необходимо только приемное устройство, работающее по сигналам одной или нескольких ГНСС. Однако существует широкий спектр задач координатно-временного и навигационного обеспечения, в том числе и применительно к РТК, в которых определение координат места и времени по сигналам ГНСС невозможны или имеются высокие риски их срыва. В этих случаях актуальным яв-

ляется использование локальной навигационной системы (ЛНС), состоящей из сети опорных наземных пунктов (ОП), обеспечивающих надежное и с высокой точностью определение координат объектов навигации (ОН), в качестве которых могут выступать БЛА, самолеты и др. Известные ЛНС типа Locata [3, 4, 5] способны осуществлять навигацию летательных аппаратов, в целом очень похожую на навигацию (позиционирование) по радиосигналам ГНСС. В [6, 7] подробно представлены математические основы решения данной задачи дальномерным способом. В данном способе существует неоднозначность решения навигационной задачи, связанная с необходимостью решения квадратного уравнения, что требует дополнительных временных затрат для определения координат ОН. Кроме того, данный способ требует точной привязки шкал времени ОП, что затруднительно осуществить в связи с установкой достаточно дорогого высокостабильного эталона частоты. Поэтому целесообразнее использовать другие алгоритмы определения местоположения БЛА в условиях отсутствия или искажения сигналов ГНСС.

Целью настоящей работы является разработка асинхронного суммарно-дальномерного алгоритма позиционирования комплекса РТК на базе БЛА, обеспечивающий высокую защищенность к имитационным помехам и несанкционированному доступу в систему в условиях отсутствия или искажения сигналов ГНСС и воздействия преднамеренных помех.

1. Исходные данные и постановка задачи

Пусть $\mathbf{x} = [x, y, z]^T$ и $\mathbf{x}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$ — координаты БЛА и N опорных узлов (пунктов) соответственно, $i = \overline{1, N}$, один из которых является приемным центральным пунктом (ЦП). Без потери общности обозначим место приемного ОП R_x как \mathbf{x}_r , а координаты передающих ОП T_x — \mathbf{x}_t , $i=2, 3, \dots, N$, рисунок 1.

Рисунок 2 иллюстрирует прохождение импульсов в ЛНС на основе суммарно-дальномерной модели позиционирования.

В момент времени t_{AT} опорный узел T_x излучает импульс, который принимается БЛА в момент времени t_{TR} и опорным узлом R_x в момент времени t_{ARD} . БЛА после приема импульса, сразу же его переизлучает. Ретранслированный (переизлученный) сигнал принимается узлом R_x в момент времени t_{ARR} . Таким образом, опорный узел R_x принимает два импульса, отстоящих друг от друга на величину задержки, один от передатчика T_x , другой от БЛА.

Расстояние, соответствующее данной задержки, можно вычислить по формуле

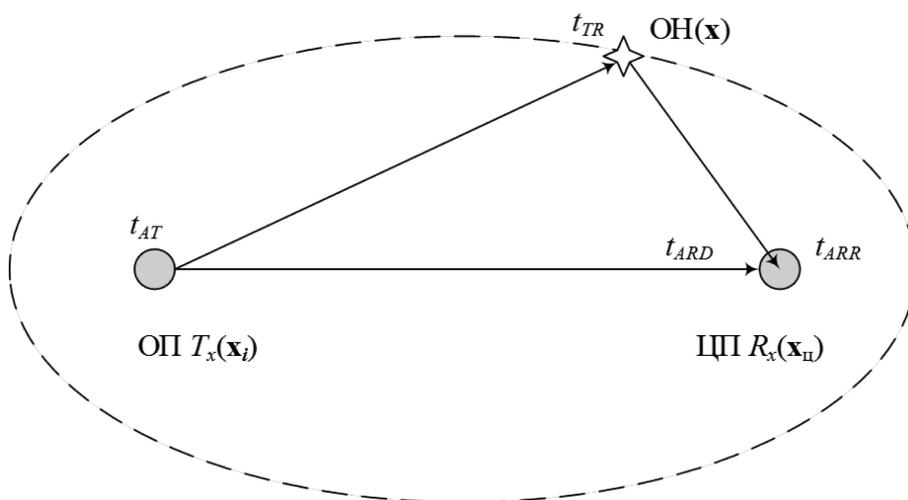


Рис. 1. Схематическое расположение двух опорных пунктов (T_x и R_x) относительно объекта навигации

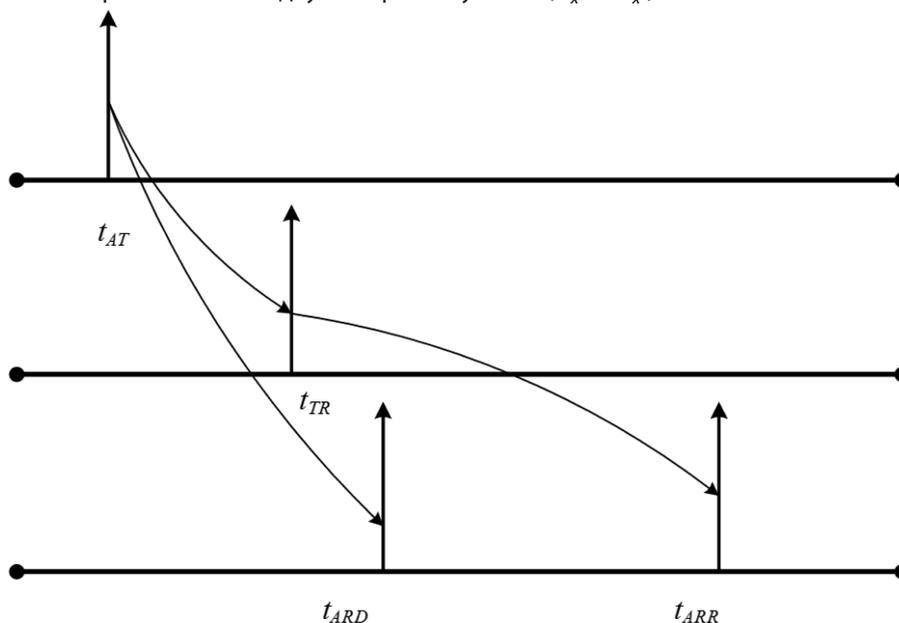


Рис. 2. Временные диаграммы сигналов, поясняющие асинхронный разностно-дальномерный способ определения координат

$$(t_{ARR} - t_{ARD}) \cdot c = \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\| + \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_1\| - \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_1\| + n_i, i = 2, 3, \dots, N. \quad (1)$$

где n_i — ошибка измерения с нулевым средним.

Выражение (1) показывает суть суммарно-дальномерного способа, при котором измеряется задержка $(t_{ARR} - t_{ARD})$ только в приемном узле R_x , и не требуется синхронизация между узлами данной системы.

Пример расположение узлов ЛНС приведен на рисунке 3.

Данная ЛНС состоит из четырех передатчиков T_x и одного приемника R_x . Сплошной линией на рисунке 3 показан прямой путь между передатчиком и приемником, а пунктирной — путь ретранслированного сигнала. Преобразуем уравнение (1) к равносильному виду

$$(t_{ARR} - t_{ARD}) \cdot c + \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_1\| = \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\| + \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_1\| + n_i, i = 2, 3, \dots, N \quad (2)$$

Из выражения (2) видно, что сумма расстояний от целевого объекта с координатами \mathbf{x} к двум узлам с фиксированными координатами \mathbf{x}_i и \mathbf{x}_1 есть величина постоянная, равная сумме $\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_1\|$ и измеренному расстоянию $d_{i1} = (t_{ARR} - t_{ARD}) \cdot c$. Из этого следует, что БЛА лежит на эллипсе, а передатчик T_x и приемник R_x являются его фокусами, рисунок 1.

Примем, что опорный приемный пункт R_x является началом системы координат, т.е. $\mathbf{x}_1 = [0, 0, 0]$. Расстояние от приемного ОП до i -го передатчика и БЛА обозначим как R_i и R_s соответственно. Здесь $R_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}$,

$i = 2, 3, \dots, M, R_s = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \mathbf{x} = [x, y, z]$ — неизвестные координаты БЛА.

Расстояние между БЛА и i -м передатчиком представим как

$$D_i = \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|, \quad (3)$$

а выражение (2) перепишем в виде

$$d_{i1} = \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\| + \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_1\| - \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_1\| + n_i = D_i + R_s - R_i + n_i. \quad (4)$$

Из выражения (4) можно найти оценку

$$\hat{D}_i = d_{i1} - R_s + R_i. \quad (5)$$

Истинное значение D_i , согласно, теореме косинусов

$$D_i^2 = R_i^2 + R_s^2 - 2\mathbf{x}_i^T \mathbf{x}. \quad (6)$$

Отсюда целевую функцию ошибки позиционирования можно выразить так

$$\mathbf{e}(\mathbf{x}) = \mathbf{A}\theta - \mathbf{b}, \quad (7)$$

где

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_2 & y_2 & z_2 & -(d_{21} + R_2) \\ x_3 & y_3 & z_3 & -(d_{31} + R_3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_N & y_N & z_N & -(d_{N1} + R_N) \end{bmatrix},$$

$$\theta = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ R_s \end{bmatrix}, \mathbf{b} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -d_{21}^2 - 2d_{21}R_2 \\ -d_{31}^2 - 2d_{31}R_3 \\ \vdots \\ -d_{N1}^2 - 2d_{N1}R_N \end{bmatrix}.$$

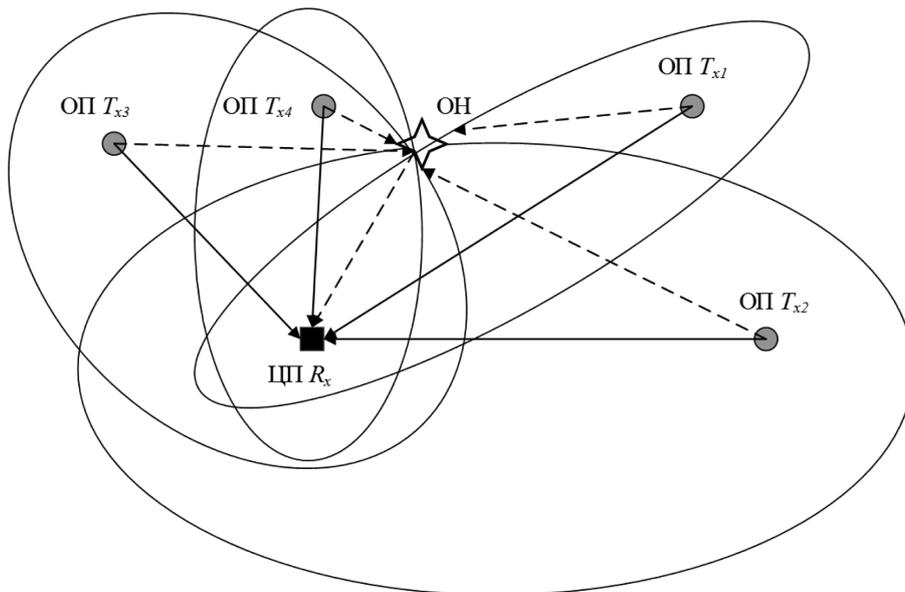


Рис. 3. Линии положения объекта при реализации асинхронного разностно-дальномерного способа определения координат

Оценка искомого параметра θ может быть получена путем минимизации целевой функции (7)

$$\hat{\theta} = \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \\ \hat{R}_s \end{bmatrix} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{b}.$$

Таким образом, задача состоит в решении уравнения (7) при наличии начального приближения и $(N-1)$ измерений разностей дальностей от $(N-1)$ передатчиков.

2. Алгоритм определения координат объекта навигации на основе суммарно-дальномерных измерений

Предлагаемый алгоритм основан на комбинации двух методов, а именно рядов Тейлора [8] и полуопределенного программирования (SDP — Semidefinite programming) [9–11].

Обозначим измеряемую разность расстояний между прямым и ретранслированным сигналами в точке приема от i -го передающего ОП

$$r_i = d_i + n_i, i = 2, 3, \dots, N, \quad (8)$$

где $n_i \sim N(0, \sigma_i^2)$ — белый шум с нулевым средним и дисперсией σ_i^2 вида

$$\sigma_i^2 = K_E (\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\| + \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_1\|)^\beta + K_E (\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_1\|)^\beta, d_i — истинная i -я разность расстояний, равная $d_i = \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\| + \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_1\| - \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_1\|$.$$

Функцию правдоподобия для r_i выразим так

$$f(r_i | d_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} \exp\left(-\frac{(r_i - d_i)^2}{2\sigma_i^2}\right). \quad (9)$$

Представим $N-1$ временных разностей в векторной форме

$$\mathbf{r} = \mathbf{d} + \mathbf{n}. \quad (10)$$

Ошибки измерений вектора \mathbf{r} опишем как положительно определенную ковариационную матрицу размером $(N-1) \times (N-1)$

$$\mathbf{N} = E[(\mathbf{n} - E[\mathbf{n}])(\mathbf{n} - E[\mathbf{n}])^T], \quad (11)$$

где $E[\bullet]$ — математическое ожидание, T — знак транспонирования. Поскольку как отмечено выше измерения r_i — независимы, то ковариационную матрицу \mathbf{N} можно выразить так

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} \sigma_2^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_3^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_N^2 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Если принять, что неизвестные координаты БЛА \mathbf{x} есть неслучайный вектор, то функцию правдоподобия для \mathbf{r} при условии \mathbf{x} можно представить в виде

$$p(\mathbf{r} | \mathbf{x}) = \frac{1}{(2\pi)^{N/2} |\mathbf{N}|} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2} [\mathbf{r} - \mathbf{d}]^T \mathbf{N}^{-1} [\mathbf{r} - \mathbf{d}]\right\}, \quad (13)$$

где $|\mathbf{N}|$ — обозначает детерминант матрицы \mathbf{N} , символ -1 определяет инверсию.

Оценку неизвестного параметра \mathbf{x} можно найти из условия минимизации квадратичной формы

$$[\mathbf{r} - \mathbf{d}]^T \mathbf{N}^{-1} [\mathbf{r} - \mathbf{d}]. \quad (14)$$

Согласно выражениям (12) и (14) окончательный результат решения поставленной задачи с использованием метода максимального правдоподобия примет вид

$$\operatorname{argmin}_{\mathbf{x}} \sum_{i=2}^N \frac{(r_i - \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\| - \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_1\| + \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_1\|)^2}{\sigma_i^2}. \quad (15)$$

Как можно видеть из формулы (15) целевая функция не является линейной и выпуклой. Отсюда следует, что неправильный выбор начального условия может привести к сходимости алгоритма в локальной точке поверхности целевой функции. С целью разрешения данного противоречия (обеспечения сходимости алгоритма в глобальной точке) можно воспользоваться методом оптимизации SDP [11].

Расширим уравнение (15) и представим его в виде

$$\operatorname{argmin}_{\mathbf{x}} \frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|^2 + 2 \cdot \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\| \cdot \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_1\| + \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_1\|^2}{\sigma_i^2} - \frac{2 \cdot \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\| (\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_1\| + r_i)}{\sigma_i^2} + \frac{2 \cdot \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_1\| (\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_1\| + r_i)}{\sigma_i^2} + \frac{r_i^2 + \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_1\|^2 + 2r_i \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_1\|}{\sigma_i^2}. \quad (16)$$

Если ввести следующие обозначения $h_i = \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|$, $\mathbf{h} = [h_1, h_2, \dots, h_M]^T$ и отбросить в (16) члены, не влияющие на решение оптимизационной задачи, то целевую функцию правдоподобия (при условии $h_i = \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|$) можно выразить для решения ограниченной оптимизации так

$$\operatorname{argmin}_{\mathbf{x}, \mathbf{h}} \sum_{i=2}^M \frac{h_i^2 + 2 \cdot h_i \cdot h_1 + h_1^2}{\sigma_i^2} - \frac{2 \cdot h_i (\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_1\| + r_i) + 2 \cdot h_1 (\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_1\| + r_i)}{\sigma_i^2}. \quad (17)$$

Функция стоимости (17) остается нелинейной из за членов h_i^2 , $h_i \cdot h_1$ и h_1^2 . Путем введения параметра $\mathbf{H} = \mathbf{h}\mathbf{h}^T$ и представления $h_i h_1 = h_{i1}$ решение становится явным

$$\operatorname{argmin}_{\mathbf{x}, \mathbf{h}, \mathbf{R}} \sum_{i=2}^M \frac{h_{ii} + 2 \cdot h_{i1} + h_{11}}{\sigma_i^2} - \frac{2 \cdot h_i (\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_1\| + r_i) + 2 \cdot h_1 (\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_1\| + r_i)}{\sigma_i^2}, \quad (18)$$

где $h_{ij} = \mathbf{x}^T \mathbf{x} + \mathbf{x}_i^T \mathbf{x}_i - 2\mathbf{x}_i^T \mathbf{x}, i = 1, 2, \dots, M. \quad (19)$

Кроме того, используя новую переменную $z = \mathbf{x}^T \mathbf{x}$ решение (18) можно представить так

$$\operatorname{argmin}_{\mathbf{x}, \mathbf{h}, \mathbf{R}, z} \sum_{i=2}^M \frac{h_{ii} + 2 \cdot h_{i1} + h_{11}}{\sigma_i^2} - \frac{2 \cdot h_i (\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_1\| + r_i) + 2 \cdot h_1 (\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_1\| + r_i)}{\sigma_i^2}, \quad (20)$$

при условии $\begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{h} \\ \mathbf{h}^T & 1 \end{bmatrix} \succ \mathbf{0}_{(m+1) \times (m+1)}, \begin{bmatrix} z & \mathbf{x}^T \\ \mathbf{x} & \mathbf{I}_2 \end{bmatrix} \succ \mathbf{0}_{(3 \times 3)},$

$h_{ii} = z + \mathbf{x}_i^T \mathbf{x}_i - 2\mathbf{x}_i^T \mathbf{x}.$

Таким образом, суть комбинированного подхода при решении (7) заключается в нахождении начального приближения (на основе описанного выше SDP уравнения) и его применения в методе Тейлора с целью достижения быстрой и устойчивой сходимости данного метода.

Приведем описание метода Тейлора применительно к суммарно-дальномерной модели. Обозначим $f_i(\mathbf{x}) = \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\| + \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_1\|$ и представим функцию ошибок в виде

$$e_i(\mathbf{x}) = r_i + \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_1\| - f_i(\mathbf{x}). \quad (21)$$

Пусть $\mathbf{x}_0 = [x_0, y_0, z_0]^T$ начальные координаты объекта навигации, $\Delta \mathbf{x} = [\delta x, \delta y, \delta z]^T$ — небольшое приращение (невязка) \mathbf{x} .

Применяя к (21) разложение в ряд Тейлора имеем

$$\mathbf{e} = \mathbf{b} - \mathbf{A} \cdot \Delta \mathbf{x}, \quad (22)$$

где $\mathbf{A} \triangleq \begin{bmatrix} \frac{\partial f_2(\mathbf{x})}{\partial x} & \frac{\partial f_2(\mathbf{x})}{\partial y} & \frac{\partial f_2(\mathbf{x})}{\partial z} \\ \frac{\partial f_3(\mathbf{x})}{\partial x} & \frac{\partial f_3(\mathbf{x})}{\partial y} & \frac{\partial f_3(\mathbf{x})}{\partial z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_M(\mathbf{x})}{\partial x} & \frac{\partial f_M(\mathbf{x})}{\partial y} & \frac{\partial f_M(\mathbf{x})}{\partial z} \end{bmatrix},$

$$\mathbf{b} \triangleq \begin{bmatrix} r_2 + \|\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1\| - f_2(\mathbf{x}_0) \\ r_3 + \|\mathbf{x}_3 - \mathbf{x}_1\| - f_3(\mathbf{x}_0) \\ \vdots \\ r_M + \|\mathbf{x}_M - \mathbf{x}_1\| - f_M(\mathbf{x}_0) \end{bmatrix}.$$

Тогда оценка погрешности метода наименьших квадратов для 22 (2.29) равна

$$\Delta \mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b}, \quad (23)$$

а координаты объекта навигации

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + \Delta \mathbf{x}. \quad (24)$$

Процесс вычисления по формулам (23) и (24) продолжается пока величина приращение $\Delta \mathbf{x}$ не станет достаточно малой.

3. Оценка предела точности позиционирования с использованием суммарно-дальномерной модели

Будем считать, что ошибки измерения n_i суммарных дальностей

$$r_i = d_i + n_i, i = 2, 3, \dots, N \quad (25)$$

независимы для каждого момента времени и распределены по нормальному закону ($n_i \sim N(0, \sigma_i^2)$) с нулевым математическим ожиданием и дисперсией вида

$$\sigma_i^2 = K_E (\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\| + \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_1\|)^\beta + K_E (\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_1\|)^\beta. \quad (26)$$

Потенциальная точность определения координат объекта наблюдения определяется информационной матрицей Фишера [12, 13]

$$\mathbf{F}(\boldsymbol{\theta}) = -\mathbb{E} \left[\frac{\partial^2 \ln p(\mathbf{d}, \boldsymbol{\theta})}{\partial \boldsymbol{\theta}^2} \right], \quad (27)$$

где \mathbf{d} — вектор наблюдаемых значений, $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]^T$ — неизвестный вектор параметров, который требуется оценить, $p(\mathbf{d}; \boldsymbol{\theta})$ — условная плотность вероятности вектора наблюдений при некотором параметре $\boldsymbol{\theta}$ (функция правдоподобия).

Функция правдоподобия для измеряемого параметра r_i определяется выражением

$$f(r_i | d_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} \exp\left(-\frac{(r_i - d_i)^2}{2\sigma_i^2}\right). \quad (28)$$

Для описанной выше модели наблюдения дисперсия оценки неизвестного параметра $\boldsymbol{\theta}$ не может быть меньше нижней границы (НГКР), определяемой неравенством Крамера-Рао [13]

$$\text{var}(\hat{\theta}) \geq \frac{1}{\mathbf{F}(\theta)} = \frac{1}{-\mathbb{E}\left[\frac{\partial^2 \ln p(\mathbf{d}; \theta)}{\partial \theta^2}\right]}, \quad (29)$$

где $\text{var}()$ — знак дисперсии, \mathbf{F} — информация Фишера, $\mathbb{E}()$ — знак математического ожидания.

Натуральный логарифм функции правдоподобия $f(r | \mathbf{x})$ с учетом (26) и (28)

$$\ln f(r | \mathbf{x}) = -\frac{1}{2} \ln(2\pi K_E) - \frac{1}{2} \ln\left[\left(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\| + \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_1\|\right)^\beta\right] - \frac{1}{2K_E} \frac{\left(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\| + \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_1\| - \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_1\| - r\right)^2}{\left(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\| + \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_1\|\right)^\beta + \left(\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_1\|\right)^\beta} \quad (30)$$

С учетом следующей замены в выражении (30), а именно

$$A = -\frac{1}{2} \ln\left[\left(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\| + \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_1\|\right)^\beta + \left(\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_1\|\right)^\beta\right], \quad (31)$$

$$B = -\frac{1}{2K_E} \frac{\left(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\| + \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_1\| - \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_1\| - r\right)^2}{\left(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\| + \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_1\|\right)^\beta + \left(\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_1\|\right)^\beta}. \quad (32)$$

производные, входящие в состав матрицы Фишера примут вид

$$\begin{aligned} \mathbb{E}\left[\frac{\partial^2 A}{\partial \mathbf{x}^2}\right] &= \frac{\beta^2 \cdot \left[\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\| + \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_1\|\right]^{2\beta-2} \cdot \left(\frac{x - x_1}{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_1\|} + \frac{x - x_i}{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|}\right)^2}{2 \cdot \left[\left(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\| + \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_1\|\right)^\beta + \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_1\|^\beta\right]^2} \\ &+ \frac{\beta \cdot \left(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\| + \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_1\|\right)^{\beta-1} \cdot \left[\frac{(x - x_1)^2}{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_1\|^3} + \frac{(x - x_i)^2}{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|^3} - \frac{1}{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_1\|} - \frac{1}{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|}\right]}{2 \cdot \left[\left(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\| + \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_1\|\right)^\beta + \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_1\|^\beta\right]} \\ &+ \frac{\beta(\beta - 1) \cdot \left(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\| + \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_1\|\right)^{\beta-2} \cdot \left(\frac{x - x_1}{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_1\|} + \frac{x - x_i}{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|}\right)^2}{2 \cdot \left[\left(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\| + \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_1\|\right)^\beta + \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_1\|^\beta\right]} \\ \mathbb{E}\left[\frac{\partial^2 B}{\partial x^2}\right] &= \frac{\beta(\beta - 1) \cdot \left(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\| + \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_1\|\right)^{\beta-2} \cdot \left(\frac{x - x_1}{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_1\|} + \frac{x - x_i}{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|}\right)^2 \cdot \sigma_i^2}{2 \cdot K_E \cdot \left[\left(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\| + \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_1\|\right)^\beta + \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_1\|^\beta\right]^2} \\ &+ \frac{\beta^2 \cdot \left(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\| + \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_1\|\right)^{2\beta-2} \cdot \left(\frac{x - x_1}{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_1\|} + \frac{x - x_i}{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|}\right)^2 \cdot \sigma_i^2}{K_E \cdot \left[\left(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\| + \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_1\|\right)^\beta + \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_1\|^\beta\right]^3} \\ &+ \frac{\beta \cdot \left(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\| + \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_1\|\right)^{\beta-1} \cdot \sigma_i^2 \cdot \left[\frac{(x - x_1)^2}{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_1\|^3} + \frac{(x - x_i)^2}{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|^3} + \frac{1}{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_1\|} - \frac{1}{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|}\right]}{2 \cdot K_E \cdot \left[\left(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\| + \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_1\|\right)^\beta + \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_1\|^\beta\right]^2} \\ &+ \frac{\left(\frac{x - x_1}{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_1\|} + \frac{x - x_i}{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|}\right)^2}{K_E \cdot \left[\left(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\| + \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_1\|\right)^\beta + \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_1\|^\beta\right]} \end{aligned}$$

4. Результаты моделирования

Оценка качества позиционирования объектов навигации выполнена с использованием разработанной модели ЛНС на базе асинхронного РДС, состоящей из четы-

рех ОП, ЦП с известными координатами и четырех ОН (БЛА), координаты которых требовалось определить на интервале времени их полета $t = 60$ сек). Расстояние между ОП и группы БЛА составило от 50 до 70 км, а между БЛА $\Delta_{1,2} = 8,6$ км, $\Delta_{1,3} = 16,5$ км, $\Delta_{1,4} = 11,5$ км,

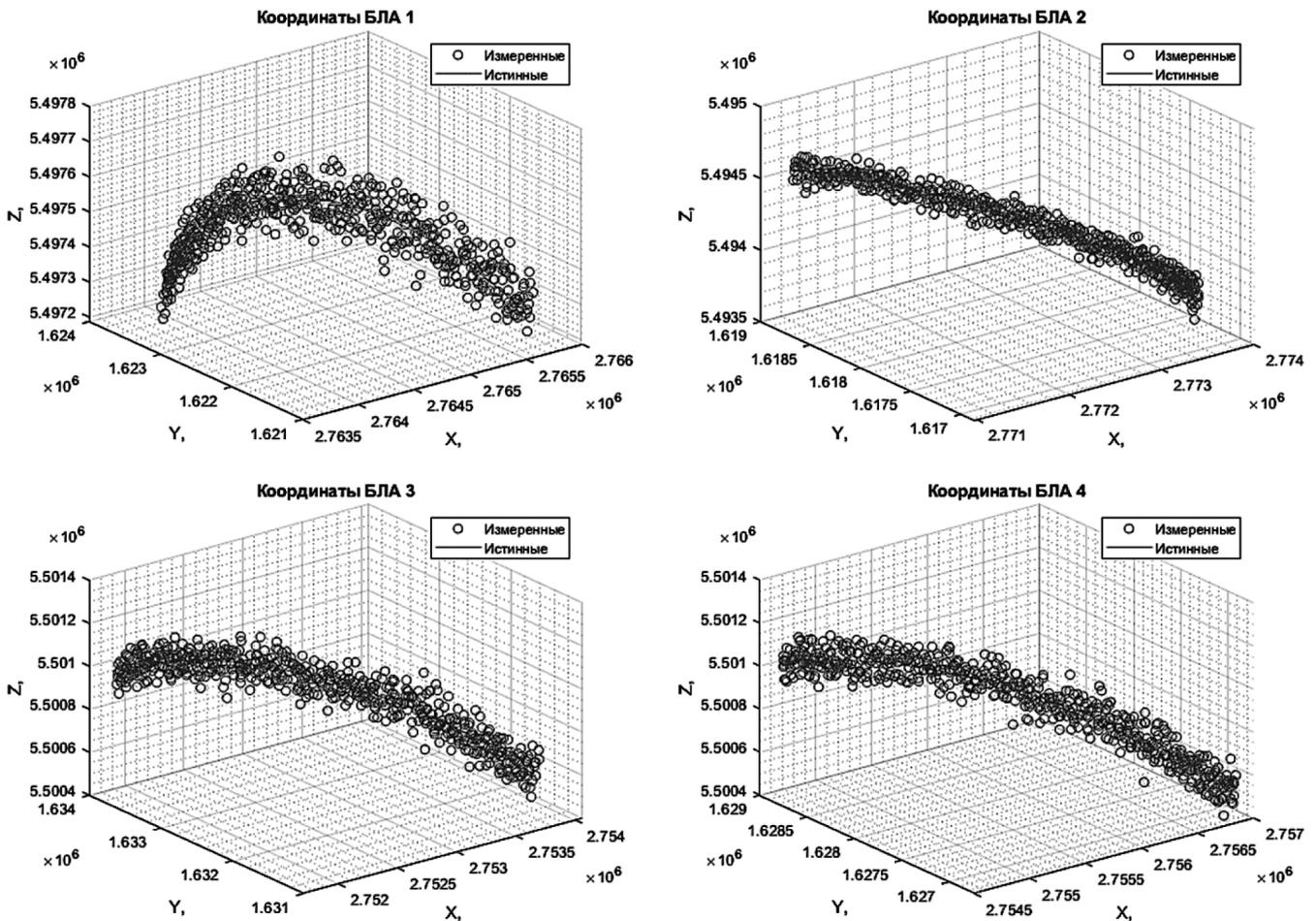


Рис. 4. Результаты моделирования (графики изменения мгновенных оценок координат БЛА, полученные с использованием предложенной ЛНС)

$\Delta_{2,3} = 25,1$ км, $\Delta_{2,4} = 20,1$ км, $\Delta_{3,4} = 5,6$ км. Удаление ЦП от ОП составило примерно 15 км. Измерения проводились с дискретностью 1 сек. Результаты измерений оформлены в виде графиков мгновенных значений координат БЛА. Результаты приведены на рисунке 4. При этом полагалось, что ошибки позиционирования ОП и ЦП отсутствовали.

Заключение

Анализ полученных результатов показывает возможность позиционирования группы объектов навигации асинхронным суммарно-дальномерным способом с по-

грешностью по осям координат x, y, z не хуже значений 29 м, 20 м и 47 м соответственно при их значительном, до 70 км, удалении от элементов ЛНС. При нахождении ОН в зоне, ограниченной координатами ОП, ошибки измерений по осям x, y, z не превышают 90 см при условии отсутствия погрешностей в определении собственных координат ЦП и ОП.

Описанный подход позволяет обеспечить одновременную навигацию для всех БЛА в комплексе РТК без использования дорогостоящих систем точного времени за счет организации работы ЛНС в суммарно-дальномерном режиме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Терентьев А.В., Коротков В.Ф. Радиотехническая разведка: Теория и практика обработки радиолокационных сигналов. — СПб.: Медиапапир, 2021. С.41–55.
2. Методы спутникового и наземного позиционирования. Перспективы развития технологий обработки сигналов. Под ред. Д. Дардари, Э. Фаллетти, М. Луизе. Москва: Техносфера, 2012. (с. 57–80, 118–200).
3. ICD-LOC-100A. Locata Net Positioning Control Document 2011. Locata Corp Pty Ltd, September 2011. www.locatacorp.com.
4. J.C. Chen et al., "Coherent Acoustic Array Processing and Localization on Wireless Sensor Networks", Proc. of the IEEE, vol. 91, no. 8, pp. 1154–1162, August 2003.
5. S. Gezici, Z. Tian, G. B. Giannakis, H. Kobayashi, A. F. Molisch, H. V. Poor, and Z. Sahinoglu, "Localization via ultra-wideband radios: a look at positioning aspects for future sensor networks", IEEE Signal Processing Magazine, vol. 22, no. 4, pp. 70–84, 2005.
6. Уварова Н.А., Прохорцов А.В. Аналитическое нахождение координат по сигналам СНС на основе дальномерного метода // Инновационные наукоемкие информационные технологии. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. С. 62–65.
7. M. Sun and K. C. Ho, "Successive and asymptotically efficient localization of sensor nodes in closed-form", IEEE Trans. on Signal Processing, vol. 57, no. 11, pp. 4522–4537, 2009.
8. W. Foy, "Position-location solutions by Taylor-series estimation", IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, vol. 2, no. AES-12, pp. 187–194, 1976.
9. A. M. C. So and Y. Ye, "Theory of semidefinite programming for sensor network localization", Mathematical Programming, vol. 109, no. 2-3, pp. 367–384, 2007.
10. Z. Sahinoglu, S. Gezici, and I. Guvenc, "Ultra-wideband positioning systems", Cambridge, New York, 2008.
11. K. Lui, F. Chan, and H. So, "Semidefinite programming approach for rangedifference based source localization", IEEE Trans. on Signal Processing, pp. 1630–1633, April 2009.
12. Чубич В.М. Вычисление информационной матрицы Фишера в задаче активной параметрической идентификации стохастических нелинейных дискретных систем // Науч. вестн. НГТУ. — 2009. — №1(34). — С. 23–40.
13. T. Jia and R. M. Buehrer, "A new Cramer-Rao lower bound for TOA-based localization", in Proc. IEEE Military Communications Conference, pp. 1–5, IEEE, 2008.

© Копыльцов Владимир Юрьевич (vkopylsov@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

СОРАЗМЕРНОСТЬ НОРМАТИВНЫХ ТРЕБОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ВОЗМОЖНОГО ИМУЩЕСТВЕННОГО ВРЕДА В СЛУЧАЕ ПОЖАРА

PROPORTIONALITY OF REGULATORY REQUIREMENTS IN THE FIELD OF FIRE SAFETY IN FORECASTING POSSIBLE PROPERTY DAMAGE IN THE EVENT OF A FIRE

**I. Lobaev
T. Firsova
E. Meshalkin
A. Kravchenko**

Summary. The article is devoted to the topic of information synthesis to reduce a large amount of regulatory information in the field of fire safety. The basis of the research is the law enforcement activities of officials of the state fire supervision bodies, operating with large volumes of complex regulatory information in the field of fire resistance of load-bearing structures.

The study of the nature of the production of professionally significant information made it possible to formulate approaches to the development of methods that can significantly reduce complex calculation methods for assessing fire risks, replacing them with simple express formulas that can be used by a wide range of users in the field. At the same time, the replacement of complex calculation methods with simple ones makes it possible to reduce the time spent on assessing fire risks for the load-bearing structures of the building by dozens of times.

In this regard, the time for assessing the proportionality of the applied mandatory fire safety requirements to the costs of the persons in respect of whom they are established for their implementation is reduced. This is especially true in relation to significant capital investments in fire protection of buildings and structures in the form of fire resistance of the main building structures, which in many respects is an excessive, and sometimes insufficient measure in relation to the real temperature conditions and duration of the fire, which requires an estimated assessment and significantly complicates the implementation of the relevant functions of state fire supervision.

Keywords: state fire supervision, fire resistance, damage, fire, express assessment, proportionality, duration of fire.

Лобаев Игорь Александрович

Кандидат технических наук, профессор, Академия
Государственной противопожарной службы МЧС России
ialobaev@yandex.ru

Фирсова Татьяна Федоровна

Доцент, Академия Государственной
противопожарной службы МЧС России
tatyana-firsova@yandex.ru

Мешалкин Евгений Александрович

Доктор технических наук, профессор, Академия
Государственной противопожарной службы МЧС России
meshalkin@gefest.com.ru

Кравченко Александр Борисович

Академия Государственной
противопожарной службы МЧС России
meshalkin@gefest.com.ru

Аннотация. Статья посвящена теме информационного синтеза по сокращению большого объема нормативной информации в области пожарной безопасности. Базой исследования явилась правоприменительная деятельность должностных лиц органов государственного пожарного надзора, оперирующих большими объемами сложной нормативной информации в области огнестойкости несущих конструкций.

Изучение природы производства профессионально значимой информации позволило сформулировать подходы к разработке методов, позволяющих значительно сократить сложные расчетные методики оценки пожарных рисков, заменив их простыми экспресс-формулами, которые могут применяться широким кругом пользователей в полевых условиях. При этом замена сложных расчетных методов на простые позволяет в десятки раз сократить затраты времени на оценку пожарных рисков по несущим конструкциям здания.

В этой связи сокращается время на оценку соразмерности применяемых обязательных требований пожарной безопасности затратам лиц, в отношении которых они устанавливаются на их исполнение. Особенно это актуально применительно к значительным капитальным вложениям на противопожарную защиту зданий, сооружений в виде огнестойкости основных строительных конструкций, во многом являющейся избыточной, а иногда и недостаточной мерой по отношению к реальным температурным режимам и продолжительности пожара, что требует расчетной оценки и значительно затрудняет реализацию соответствующих функций государственного пожарного надзора.

Ключевые слова: государственный пожарный надзор, огнестойкость, ущерб, пожар, экспресс-оценка, соразмерность, продолжительность пожара.

Цель исследования: разработка новой — эквивалентной информации, позволяющей оперировать большими объемами нормативной информации в области пожарной безопасности, на примере методики экспресс-оценки пожарных рисков, соразмерных требованиям к огнестойкости несущих конструкций, выполняющих свою функцию в условиях реального пожара.

Задача

Применение требований пожарной безопасности к конструкциям с нормируемыми пределами огнестойкости, соразмерных риску причинения вреда этим конструкциям при реальном пожаре.

Методы исследования

Метод причинно-следственного анализа применения требований пожарной безопасности к огнестойкости несущих конструкций, направленный на установление ключевых причин нежелательных последствий, минимизацию ущерба при пожаре, рассчитанного прогнозными математическими методами, установленными нормативными документами в области пожарной безопасности.

Научная новизна

Определено несоответствие между областями применения требований пожарной безопасности и областями реальных пожарных рисков. Выявлены зависимости максимальных температур и времени их воздействия на строительные конструкции здания от концентрации пожарной нагрузки, проемности и высоты помещений. Разработан алгоритм (методика) экспресс-оценки пожарных рисков, как эквивалентной информации, позволяющей оперировать большими объемами нормативной информации в области огнестойкости несущих конструкций.

Результаты и обсуждение

Результаты исследования могут быть использованы для разработки эффективных нормативных требований пожарной безопасности по защите несущих конструкций здания с нормируемыми пределами огнестойкости, соразмерных характеру нарушений обязательных требований и риску причинения вреда в условиях реального пожара.

Выводы

Применение экспресс-оценки пожарных рисков при проведении контрольно-надзорных мероприятий повышает эффективность применения риск-ориентированной модели контрольно-надзорной деятельности сораз-

мерной вмешательству в деятельность контролируемых лиц. Таким образом, разработка новой — эквивалентной информации, позволит оперировать большими объемами информации посредством компактных эквивалентов с минимальными информационными потерями, высокой надежностью, скоростью поиска, обработки и передачи информации.

Введение

Мониторинг требований пожарной безопасности в части огнестойкости конструкций в рамках анализа произошедших пожаров в торговом центре «Синдика» на МКАД (Москва, 2017 год), 3-й энергоблок Березовской ГРЭС Красноярского Края (2017 год), высокостеллажный складской комплекс ОЗОН (Московская область, 2022 год) показал, что установленные нормативные требования к огнестойкости несущих конструкций могут быть как избыточны, так и недостаточны относительно реальной продолжительности пожара, которая становится критической в определенный момент времени и при определенных температурах, воздействующих на несущие конструкции зданий, сооружений с установленным нормативным пределом огнестойкости. В этой связи авторами проведена научно-исследовательская работа по изучению данного обстоятельства с целью разработки рекомендаций по устранению причин и условий, способствующих правонарушениям в области применения нормативных требований к огнестойкости несущих конструкций. При этом критерием соответствия требований пожарной безопасности в части огнестойкости является применяемые меры по пресечению и (или) устранению нарушений обязательных требований, соразмерные характеру нарушений обязательных требований, вреду (ущербу), который причинен или может быть причинен охраняемым законом ценностям, что согласуется со ст.9 Федерального закона «О государственном контроле (надзоре) и муниципальном контроле в Российской Федерации» от 31.07.2020 N 248-ФЗ[1].

Научная новизна работы заключается: в получении новых соотношений критической продолжительности пожара от вида и количества пожарной нагрузки, проемности и объемно-планировочных решений зданий, сооружений; в установлении взаимосвязи пределов огнестойкости несущих строительных стальных конструкций по признаку R от критической продолжительности пожара в помещении; алгоритме оценки соразмерности требуемого и фактического (расчетного) предела огнестойкости продолжительности реального пожара и риск-ориентированной модели контрольно-надзорной деятельности в части соразмерности вмешательства в деятельность контролируемых лиц.

Разработка новой концепции нормирования пределов огнестойкости несущих конструкций, позволяющей

увязать положения Гражданского кодекса и Федерального закона «О пожарной безопасности» и конкретизировать методику оценки пожарного риска, определяет практическую значимость исследования.

Применение требований пожарной безопасности к огнестойкости несущих конструкций соразмерных риску причинения вреда требует корректировки термина пожарный риск, определенного п.п. 28) ст. 2 ФЗ-123 «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности», как «мера возможности реализации пожарной опасности объекта защиты и ее последствий для людей и материальных ценностей».

В связи с этим пожарный риск определяется как наличие условий возникновения пожара и причинения вреда возможным пожаром. Оценка пожарных рисков — выявление условий причинения вреда возможным пожаром и определение характера (размеров) этого вреда.

Необходимость такого подхода к определению пожарного риска (в отличие от вероятностного) обусловлена тем, что действующее законодательство оперирует понятием вред, который имеет свои размеры в натуральном и (или) денежном выражении [2].

Например, ч.1 ст.1064 Гражданского кодекса Российской Федерации содержит положение о том, что вред, причиненный имуществу юридического лица, подлежит возмещению в полном объеме лицом, причинившим вред.

При этом лицо, причинившее вред освобождается от возмещения вреда, если докажет, что вред причинен не по его вине (ч.2 ст.1064 ГК РФ).

При квалификации вины устанавливается осознавало ли лицо общественную опасность своих действий и предвидело ли наступление общественно опасных последствий (ст. ст.25 и 26 УК РФ). Опасность причинения вреда может явиться основанием к иску о запрещении деятельности, создающей такую опасность (ч.1 ст.1065 ГК РФ).

С учётом этого хозяйствующие субъекты и граждане должны обеспечивать соблюдение мер пожарной безопасности «в соответствии с законодательством Российской Федерации, нормативными документами по пожарной безопасности, а также на основе опыта борьбы с пожарами, оценки пожарной опасности веществ, материалов, технологических процессов, изделий, конструкций, зданий и сооружений» (ст.21 Федерального закона «О пожарной безопасности»).

Раздел 1. Анализ материалов по оценке пределов огнестойкости по критической продолжительности пожара

Анализ и оценка математических моделей прогнозирования опасных факторов пожара для несущих конструкций здания, сооружения на основе расчетного метода температурных режимов пожара в помещении по Приложению П ГОСТ Р 12.3.047-2012 «Пожарная безопасность технологических процессов» и установления критической продолжительности пожара показали, что по зависимости критических температур воздействия на несущие строительные конструкции от вида и количества пожарной нагрузки можно оценить требуемые пределы огнестойкости конструкций, как это показано на рис. 1.

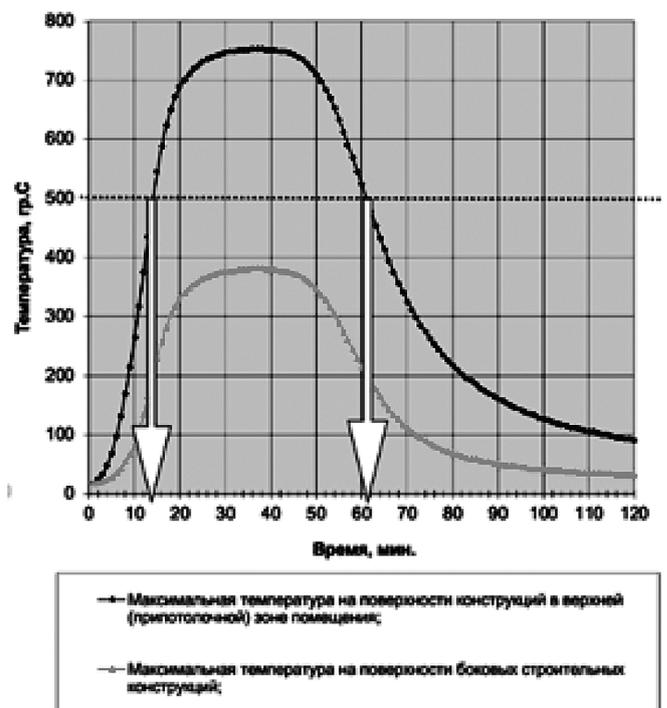


Рис. 1. Температурный режим в помещении объёмом 180 м³ (L*b*h=10*6*3)

Причем за критическое время воздействия на несущие конструкции при реальном пожаре авторами монографии [5] принимается время воздействия при 500°C, и рассматриваются фрагменты зданий L*b*h=10*6*3 м, а также 10*6*6 м с учетом интегральной математической модели. На основе математического моделирования пожара в помещении по ГОСТ Р 12.3.047-2012 было получено множество значений критической продолжительности пожара и найдены зависимости этих значений от проемности ($F_{пр}/F_n=5-25\%$) и высоты (3-6 м) помещений, что позволило получить авторам экспресс-формулу критической концентрации пожарной нагрузки (кг/м³). Проведенное исследование позволило сформулировать условия наступления пожарных рисков для конструкций

зданий: критическая концентрация пожарной нагрузки; пределы огнестойкости конструкций зданий; проемность помещений; высота помещений.

Причем, этот график, опубликованный в работе [3], который использовался для оценки критической продолжительности пожара при достижении критической температуры для стальных незащищенных конструкций $t=500^{\circ}\text{C}$, будет использоваться авторами и для температуры $t=300^{\circ}\text{C}$ для оценки критической продолжительности легких металлических конструкций (ЛМК), а также $t=900^{\circ}\text{C}$ в зависимости от марки стали применяемых несущих металлических конструкций. Таким образом, авторами будет расширена область применения требований пожарной безопасности, направленных на эквивалентную продолжительность пожара при исследовании критической продолжительности пожара по полевой математической модели, которая даст более точные результаты в каждой исследуемой точке строительных конструкций при температурном режиме пожара в помещении.

Эти условия при воздействии $t_{\text{кр}}=500^{\circ}\text{C}$ описываются формулой:

$$K = \frac{(0,22t - 1,62) \cdot \left(0,33 \frac{\Pi_i}{\Pi_1} + 0,64\right)}{0,46 \frac{B_i}{B_1} + 0,54}$$

где: K — критическая концентрация пожарной нагрузки, $\text{кг}/\text{м}^3$;

t — пределы огнестойкости несущих конструкций зданий, мин.;

$\Pi_1 = 5\%$;

Π_i — проёмность помещения (отношение площади проёмов к площади пола $F_{\text{пр}}/F_{\text{п}}$ 100) (%);

$B_1 = 3\text{ м}$;

B_i = высота помещения, м.

Демонстрируемый подход может быть реализован при определении условий наступления пожарных рисков для конструкций с наличием в помещениях различных веществ и материалов, что возможно и необходимо сделать в будущем.

При этом, условием наступления пожарных рисков по несущей способности R , будет оцениваться при вероятности равной 1 (событие обязательно произойдет). Таким образом, авторам удастся оценить не вероятностную величину, по которой происходит оценка эквивалентной продолжительности пожара — произойдет наступление критических последствий или не произойдет наступление потери несущей способности, а с высокой степенью достоверности получить точный результат при критической продолжительности воздействия критической температуры при $t=300^{\circ}\text{C}$, $t=500^{\circ}\text{C}$ и $t=900^{\circ}\text{C}$, на-

ступления последствий в виде потери несущей способности, что позволит авторам говорить об эквивалентной продолжительности пожара, по которой можно предусмотреть соразмерный риску причинения вреда предел огнестойкости конструкций.

Раздел 2. Задачи исследования

Задачи, которые поставили перед собой авторы исследования в настоящее время:

1. Определение критериев прочностных (статических) и теплотехнических расчетов фактических и требуемых пределов огнестойкости несущих строительных конструкций [4,5] для оценки соответствия критериям критической продолжительности пожара в помещении.
2. Обоснование математической формулы, номограммы или экспресс-оценки требуемого предела огнестойкости для несущих строительных конструкций в зависимости от критической продолжительности пожара в помещении на основе полевой математической модели.
3. Разработка модели и алгоритма (блок-схемы) оценки соразмерности требуемого предела огнестойкости несущих строительных конструкций и критической продолжительности пожара в помещении с учетом нового концептуального решения по оценке огнестойкости: «продолжительность пожара = огнестойкость конструкции»

Задача 1. При определении критериев прочностных (статических) и теплотехнических расчетов неизменным (constanta) остается предел огнестойкости конструкции, который определяется по стандартной температурной кривой в соответствии с ГОСТ Р ЕН 1363-2-2014. «Национальный стандарт РФ. Конструкции строительные. Испытания на огнестойкость. Альтернативные и дополнительные методы»*, в условиях когда критическое воздействие на испытываемую конструкцию наступает с начала огневого испытания до наступления одного из предельных состояний, и нормируется временем воздействия, в минутах по REI (15, 30, 45, 60, 90, 120 и т.д.).

Однако, в условиях реального пожара, начало наступления воздействия критических температур на несущие конструкции, как правило, смещается на неопределенное время, из-за больших объемов зданий, начальной стадии пожара с ее линейными скоростями (на начальной стадии пожара $0,5V_{\text{лин.}} = 10\text{ мин}$, затем $V_{\text{лин.}}$), и скорости выгорания (тепловыделение пожарной нагрузки главным образом зависит от вида, расположения и количества пожарной нагрузки, и пропорциональна площади горения). При этом, скорость выгорания пожарной нагрузки и определяет время наступления критической температуры (300°C (стекло 3 мм, ЛМК), 500°C (сталь марки АIII), $700\text{--}800^{\circ}\text{C}$ (стеклопакет однокамерный)). Причем,

отсутствие значительных градиентов термодинамических параметров (в связи с сильной степенью перемешивания нагретых газов), приводит к практически незначительному отличию локальных характеристик от средне интегральных, что позволяет описывать их развитие интегральными параметрами и использовать сравнительно простой метод моделирования, однако авторами применяется полевая математическая модель для оценки и локальных прогревов на начальной стадии и в условиях объёмных пожаров в помещении.

При этом нормативный предел огнестойкости конструкции определяет степень огнестойкости здания, которая устанавливается нормативными документами в зависимости от функционального назначения, площади и высоты помещений, что зачастую не совпадает со временем наступления потери несущей способности конструкции при реальном пожаре.

Авторами выдвинута гипотеза о том, что ожидаемое время наступления потери несущей способности будет отсрочено на столько, на сколько время начала воздействия критической температуры на несущие конструкции будет отлично от начала пожара в помещении. Данную гипотезу авторам необходимо подтвердить (или опровергнуть) с помощью математического моделирования, а по его результатам оценить период критической продолжительности пожара в условиях реального пожара, и при различных видах пожарной нагрузки (ПН), площади размещения ПН, высоты помещений и проемности помещений установить требуемый предел огнестойкости.

Критерием критической продолжительности пожара, влияющего на выбор огнестойкости несущих строительных конструкций, авторами выбрано время критического воздействия температурного режима пожара в помещении на несущие строительные конструкции при температурах 300°C–900°C.

При этом, необходимо учесть при какой критической температуре пожара наступит потеря несущей способности конструкции. Такой температурой по мнению авторов является критическая температура для стальной незащищенной конструкции. Поскольку, каждая типовая многослойная железобетонная плита перекрытия рассчитанная на нагрузку не менее 800–1000 кг/м кв площади в жилом или административном здании имеет запас прочности не менее 150–300 кг/м кв., то для всех применяемых типов плит перекрытий возможно рассчитать и спрогнозировать время потери ее несущей способности в зависимости от температуры пожара. При этом определить какая именно температура для данного типа плиты оказалась критической и привела к обрушению конструкции или ее прогибу более чем в 20 %. Если плита опирается на металлическую стальную балку, которая

при проектировании, как правило, имеет равный запас прочности, и потеря ее несущей способности по расчету наступает при более низкой критической температуре пожара, то для такого типа зданий критической должна приниматься температура равная критической температуре стальной конструкции.

Следовательно полученное при расчетах время сопротивления конструкции, находящейся под расчетной нормативной (заложенной проектом) нагрузкой, будет определять величину критической температуры при которой наступает потеря ее несущей способности, т.е. величину критической температуры, достижение которой приводит к наступлению риска обрушения, принимаемого авторами равным 1.

При этом, нетрудно предугадать последствия принятия управленческого решения руководителем тушения пожара (РТП) о назначении боевых участков и расстановки бойцов со стволами для тушения и локализации очага пожара в условиях, когда нормативные пределы не совпадают со временем реального обрушения (потери несущей способности конструкций), поскольку у РТП отсутствуют необходимые данные о критических температурах при пожаре, которые оказывают влияние на время наступления потери несущей способности конструкций.

Таким образом, разработка и учет критериев по нагрузке на конструкции, критической продолжительности воздействия и критической температуры в зданиях различного функционального назначения станет исходными данными для разработки экспресс-оценки пожарных рисков или поведения конструкций при пожаре.

Задача 2. Анализ расчетных методик по оценке пожарных рисков, экспресс-оценке пожарных рисков, а также расчетных методик нагрузки на конструкции и узлы сопряжения, которые не учитывались ранее, но оказывают огромное влияние на потерю несущей способности, позволит конкретизировать и скорректировать теоретическое обоснование проблемы применения расчетных технологий для оценки потери несущей способности конструкций здания при $t=300^\circ\text{C}$, $t=500^\circ\text{C}$ и $t=900^\circ\text{C}$ по критической продолжительности пожара или эквивалентной продолжительности пожара к которой пришли предыдущие авторы по решаемой проблеме.

Среди существующих в исследуемой области особое место занимают работы исследования температурных режимов пожаров В.М. Ройтмана, Т.Ф. Фирсовой [6], Е.А. Мешалкина, Г.И. Болодыяна [7,8] и др.

Следует заметить, что приводимые в работах вышеуказанных авторов расчетные методики невозможно применить при осуществлении надзора за объектами

по причине недостатка исходных данных для расчетов и дефицита времени, а также большого числа условий, допущений, высокой сложности расчетных алгоритмов. А между тем, при проведении контрольно-надзорных мероприятий (КНМ) по оценке соответствия объекта защиты требованиям пожарной безопасности в соответствии с ст.6 ФЗ-123 «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности», государственный пожарный надзор в большинстве случаев работает по условию: выполнены требования пожарной безопасности, содержащиеся в нормативных документах по пожарной безопасности, к которым относятся не только своды правил, но и национальные стандарты, содержащие расчетные методики, разработанные авторами в различные годы и включенные в стандарты в виде требований пожарной безопасности, которые нельзя в условиях проведения КНМ применить по срокам проведения КНМ и квалификации сотрудников. При этом, применение только мер безопасности, включенных в своды правил без оценки их соразмерности риска причинения вреда конструкциям приводит к избыточности требований или недостаточности, что в свою очередь оценивается как административный барьер и несоразмерность вмешательства в деятельность контролируемых лиц.

В этой связи, необходима математическая (статистическая) обработка множества результатов критической продолжительности пожара, полученного в зависимости от реальной пожарной нагрузки с учетом применения математической полевой модели, отвечающей за физику процесса температурного режима пожара в помещении. В результате такой обработки, например статистическими методами, возможно получить номограммы, которые можно легко и быстро использовать при об-

следовании объекта защиты и применить в качестве экспресс-оценки риска причинения вреда для применения соразмерного предела огнестойкости или применения систем противопожарной защиты, которые будут компенсировать недостающий предел огнестойкости.

Пример такой номограммы показан в указанной выше работе [3], по которой при определении критической нагрузки в помещении можно оценить требуемый предел огнестойкости (Рис. 2).

При этом, в предыдущей работе авторы использовали проемность помещений, которая играет огромную роль при пожаре, регулируемом нагрузкой и пожаре, регулируемом вентиляцией, однако в предыдущем опыте в качестве исходных данных использовалось количество пожарной нагрузки в виде массы $\{кг\}$, задача авторов привести к общему знаменателю наиболее удобные исходные данные, которые возможно получить при проведении КНМ и на месте быстро оценить возможность применяемых мер к огнестойкости конструкций и поэтому необходимо рассмотреть использование соотношений в виде $\{кг/м^2\}$ или $\{кг/м^3\}$ или в виде $\{кДж/м^2\}$, как это делается при определении категорий по взрывопожарной и пожарной опасности.

Следует обратить внимание на то обстоятельство, что данные номограмм были получены по интегральной математической модели и могут иметь достаточные погрешности как для критического воздействия на несущие конструкции здания в точках наибольших нагрузок, так и на количество и вид пожарной нагрузки в объеме помещения или здания. В этой связи авторами статьи принято решение расчеты проводить по полевым мо-

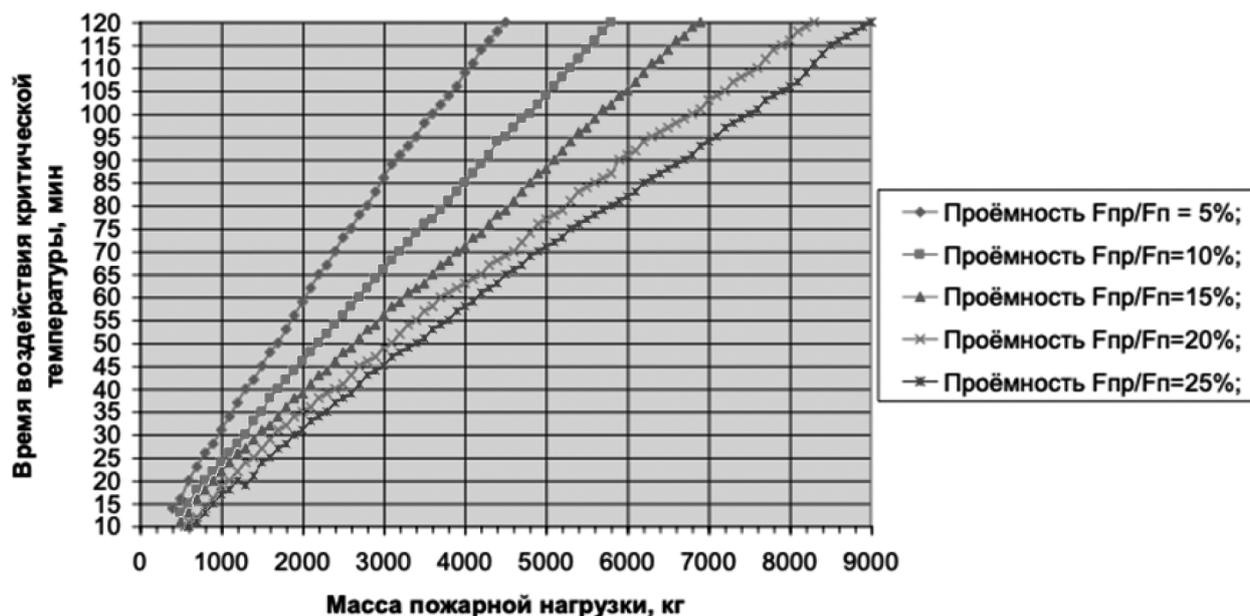


Рис. 2. Зависимость времени воздействия критической температуры на несущие строительные конструкции от массы пожарной нагрузки в помещении объемом $V=300 \text{ м}^3$ ($10*5*6 \text{ м}$)

делям, установленным в нормативно-правовых документах МЧС России, а именно: «Методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности», утв. приказом МЧС России от 14 ноября 2022 г. №1140 или «Методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах», утв. приказом МЧС России от 10.07.2009 г. №404.

Таким образом, авторами принято решение по использованию предыдущих исследований в области экспресс-оценки пожарных рисков при изменении функционального назначения зданий в качестве аналога или прототипа по решению вопроса о соразмерности нормативных требований риску причинения вреда несущим конструкциям. Такой подход позволит разработать алгоритм (блок-схему) оценки соответствия пределов огнестойкости несущих конструкций здания соразмерных критической продолжительности пожара, что возможно станет объективной альтернативой сегодняшнего алгоритма оценки пределов огнестойкости в зависимости от класса функциональной пожарной опасности и геометрических размеров зданий, сооружений (высоты и площади), что соответствует решению задачи 3.

Раздел 3. Проведение исследования критической продолжительности пожара в зависимости от удельной пожарной нагрузки 180 МДж/м²

В настоящее время уже выполнен анализ зависимости критериев опасных факторов пожара на примере

максимальной температуры пламени для помещений различного объема, имеющих одинаковую удельную пожарную нагрузку 180 МДж/м². Расчет проводился с использованием программного комплекса «Сигма-ПБ». В расчете определялась максимальная температура и время её воздействия на ограждающие конструкции в помещении пожара в зависимости от способа размещения пожарной нагрузки. Причем, удельная пожарная нагрузка в 180 МДж/м² принималась в соответствии с категорией помещения В4, определяемой по приложению Б СП 12.13130.2009. «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности». По полученным результатам, авторами были построены графики зависимости изменения максимальной температуры в различных точках помещения пожара. По данным графикам можно установить зависимость максимальной температуры пожара в помещении категории В4 от пожарной нагрузки, воздействующей на ограждающие конструкции на различном расстоянии от источника. На рис. 3 представлен график такой зависимости.

При размещении в помещении пожарной нагрузки в количестве, эквивалентном для помещений категории В4, независимо от способа её размещения максимальная температура составляет не более 300°С, что позволяет сделать вывод об отсутствии в случае пожара воздействия на несущие конструкции критической температуры, при которой конструкция с течением времени теряет или снижает свои свойства. При этом полное выгорание пожарной нагрузки происходит за промежуток времени до 10 минут.

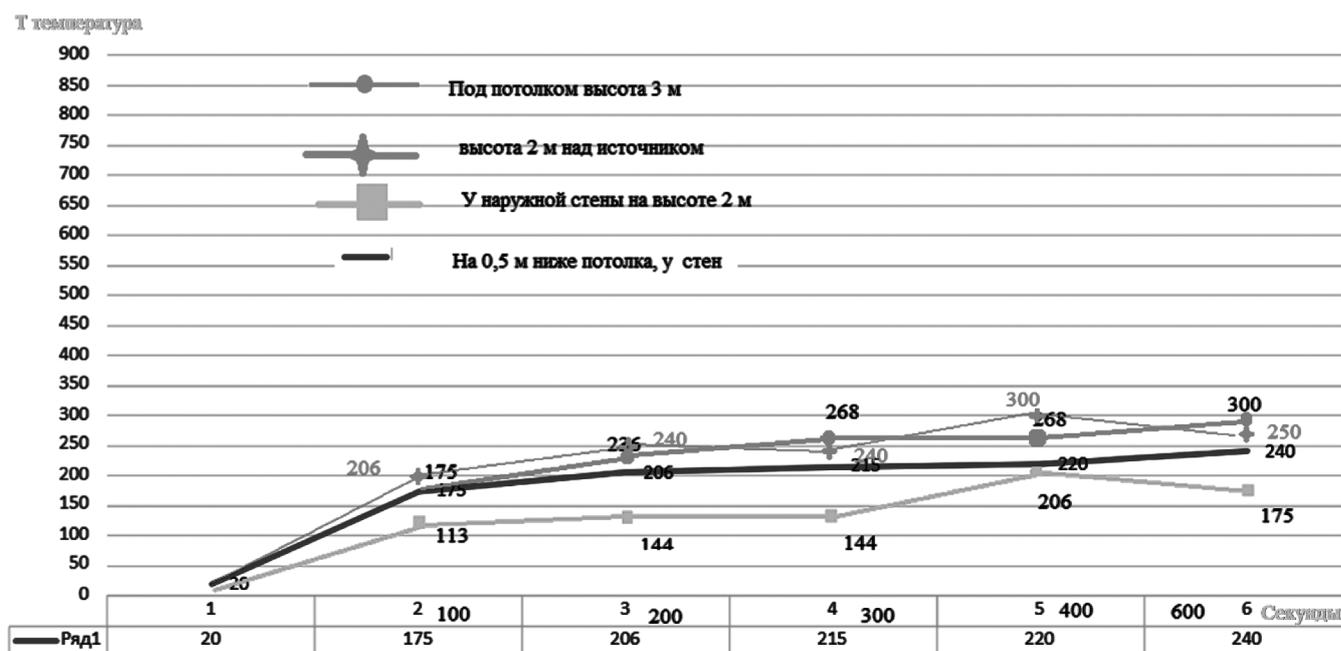


Рис. 3. Значения критической температуры при пожаре в помещении от пожарной нагрузки, соответствующей категории помещений В4

В ранее выполняемых работах по изучению влияния внешних факторов на процессы горения, проведенные кафедрой «Пожарной безопасности в строительстве» Академии ГПС МЧС России, было выявлено, что при воздействии ветра со скоростью 5–6 м/с время выгорания пожарной нагрузки сокращается в 2 раза и время воздействия высокой температуры на ограждающие конструкции снижается в 2 раза, что при таких условиях позволяет для конструкций допустить снижение значения требуемого предела огнестойкости [8].

При удельной пожарной нагрузке 180 МДж/м², которая соответствует категории В4, температурный режим достигает 300°C, и не является критическим для стальных и железобетонных несущих конструкций. В таком случае предъявлять требования к нормированию пределов огнестойкости несущих и ограждающих конструкций не целесообразно, поскольку это не соразмерно риску причинения вреда охраняемым законом ценностям.

Раздел 4. Оценка напряженно-деформированного состояния и поведения конструкции при пожаре методом конечных элементов

Для оценки напряженно-деформированного состояния и поведения металлоконструкций в условиях пожара, необходимо учитывать нестационарный характер

нагрева, то есть необходимо решение нестационарной задачи теплопроводности с учетом зависимости теплофизических свойств материала от текущей температуры [9]. Помимо этого, с ростом температуры происходит значительное снижение прочностных показателей материала, в первую очередь — модуля упругости и предела текучести. Это приводит к тому, что конструкции, изначально спроектированные на работу в упругой области, под действием расчетных нагрузок при высокотемпературном воздействии начинают упругопластически деформироваться с перераспределением усилий по силовой схеме, а это предполагает решение задачи механики деформируемого твердого тела с учетом геометрической и физической нелинейностей. Метод конечных элементов позволяет в полной мере учесть все особенности деформирования конструкции и её теплового состояния в ходе огневого воздействия. К недостаткам расчета следует отнести значительно большее время расчета в сравнении с аналитическими подходами и значительный перечень исходных данных, требуемых для формирования расчетной модели.

В качестве образца для расчета и эксперимента авторами была принята стальная двутавровая балка (Рис. 4.1).

Во время расчета программным комплексом ABAQUS 96 Standard1 авторами была создана конечно-элемент-

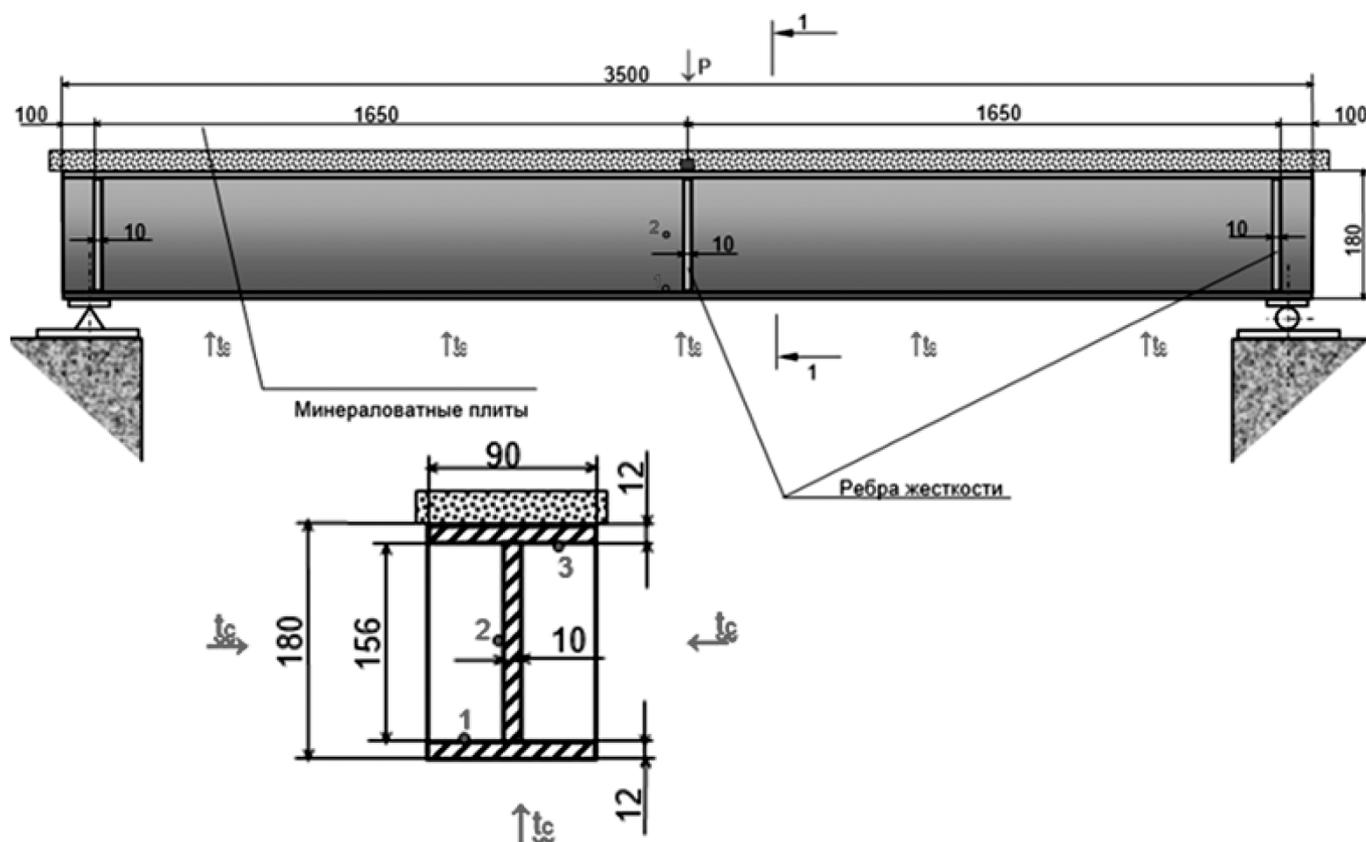


Рис. 4.1. Эскиз двутавровой балки

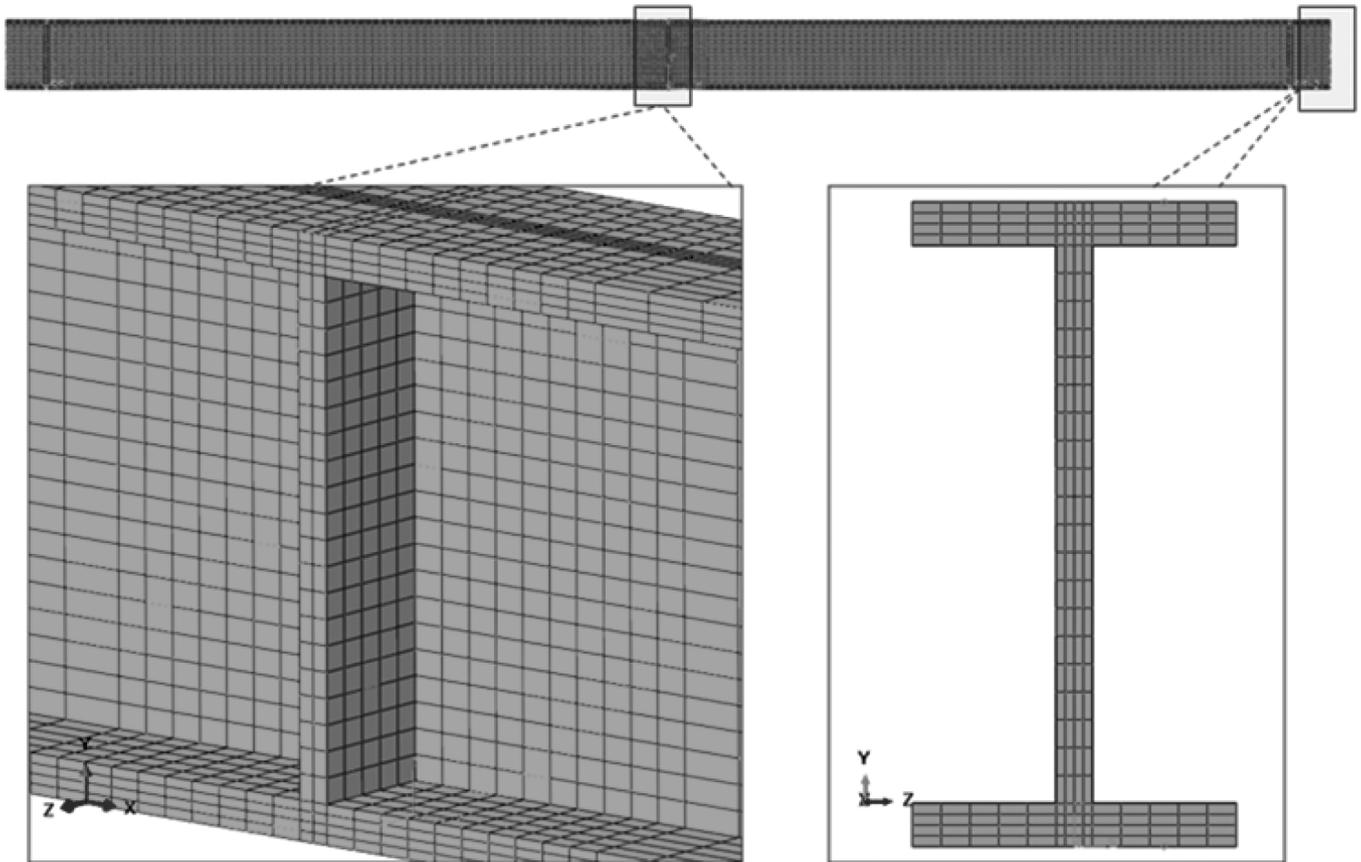


Рис. 4.2. Конечно-элементная модель балки

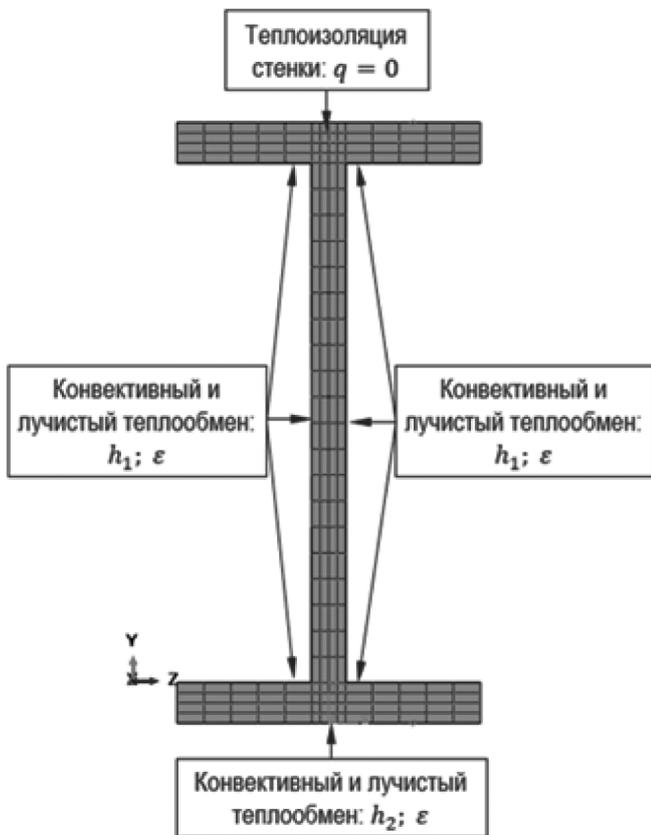


Рис. 4.3. Граничные условия тепловой задачи

ная модель двутавровой балки, которая делится на множество конечных элементов, по которым проводится расчет нагрузок и деформаций в каждом элементе (Рис. 4.2).

Поскольку при пожаре в помещении происходит обогрев двутавровой балки (перекрытие) с трех сторон, данное обстоятельство учитывалось при выполнении расчета методом конечных элементов (Рис. 4.3).

В качестве температуры окружающей среды при пожаре в помещении использовались данные фактических замеров температуры огневой камеры в ходе натуральных испытаний образцов двутавровой балки из стали (355П), проведенных на базе ФГБУ ВНИИПО МЧС России (Рис. 4.4).

Таким образом, метод конечных элементов учитывал температуру, созданную в огневой печи.

Обработка результатов, в программе позволила авторам построить графики роста температуры в разных точках обогреваемой с трех сторон конструкции перекрытия (Рис. 4.5), который показал, что время достижения критической температуры 500 °С наступает для конструкции не одновременно, а только в нижней точке 3, которая составила 700 секунд (12 минут). При этом для

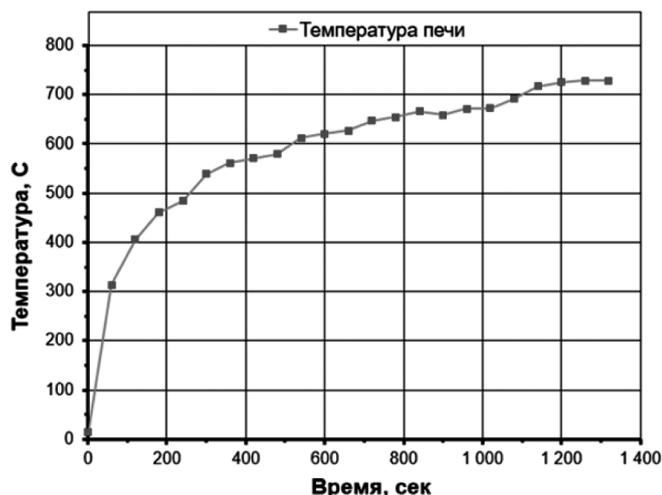


Рис. 4.4. Изменение температуры испытательной печи (испытание)

точки 1 критическая температура наступила на 1200 секунде, что составило 18 минут.

Согласно требованиям ГОСТ 30247.1–94 Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции Elements of building constructions. Fire-resistance tests methods. Load-bearing a separating constructions. испытания на огнестойкость, как правило, проводятся с использованием конструкции двутаврового сечения. Допускается проводить испытания образцов другой формы. Так при испытании двутавровой балки авторам удалось определить, что полное 100% обрушение, связанное с образованием пластичного шарнира, наступило у образца двутаврового сечения,

только тогда, когда по всему сечению от точки 3 до точки 1 критическая температура достигла 500 °С. Это позволяет более точно спрогнозировать возможное время обрушения балки (перекрытия) в условиях воздействия критической температуры, а время воздействия критической температуры напрямую зависит от количества пожарной нагрузки в здании и проемности, как это было установлено ранее (раздел 3).

Далее решена была и прочностная задача, которая учитывала результаты теплотехнического расчета (Рис. 4.6). Программой высчитывалось значение прогибов центральной части сечения балки и определялась скорость прогибов центральной части сечения балки в ходе огневого воздействия (Рис. 4.7). По полученным результатам, отраженным в виде графиков зависимости величины и скорости нарастания прогибов от времени воздействия критической температуры на двутавровую балку, авторы пришли к выводу, что формирование пластического шарнира наступает одновременно с нарастанием скорости прогибов. Это время составило менее 1 минуты. В следующих расчетах планируется изменять значение прикладываемой к образцу нагрузки, действующей во время воздействия критической температуры и получить зависимость времени наступления предельных состояний от количества приложенной нагрузки в диапазоне температур 300–900 °С. В данном расчете для испытываемого образца критической температурой пожара стала температура равная 650 °С. При достижении данной температуры на поверхности в точке 3 произошло обрушение балки.

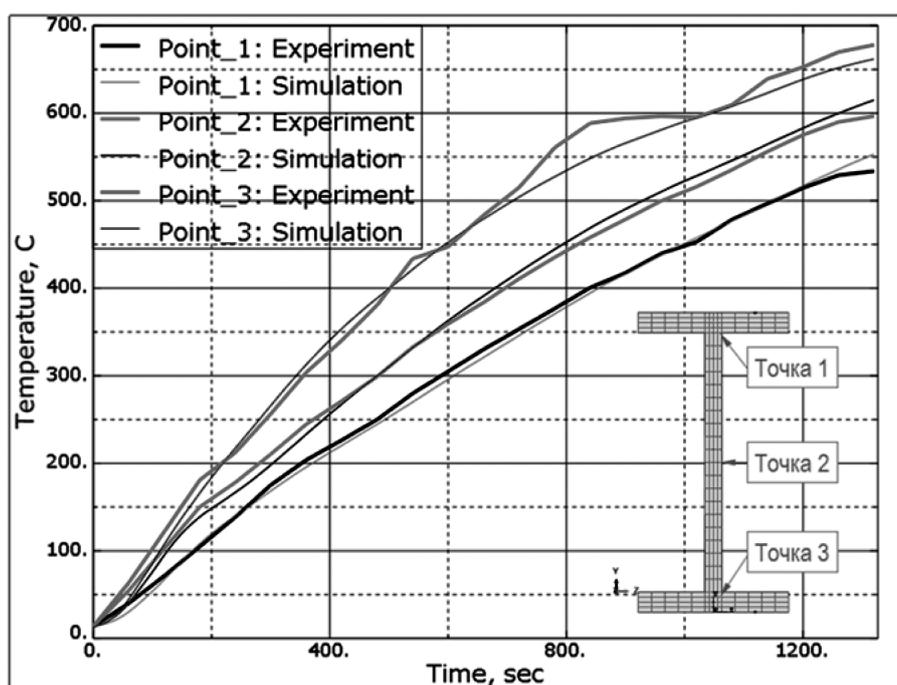


Рис. 4.5. Результаты моделирования и экспериментальные данные

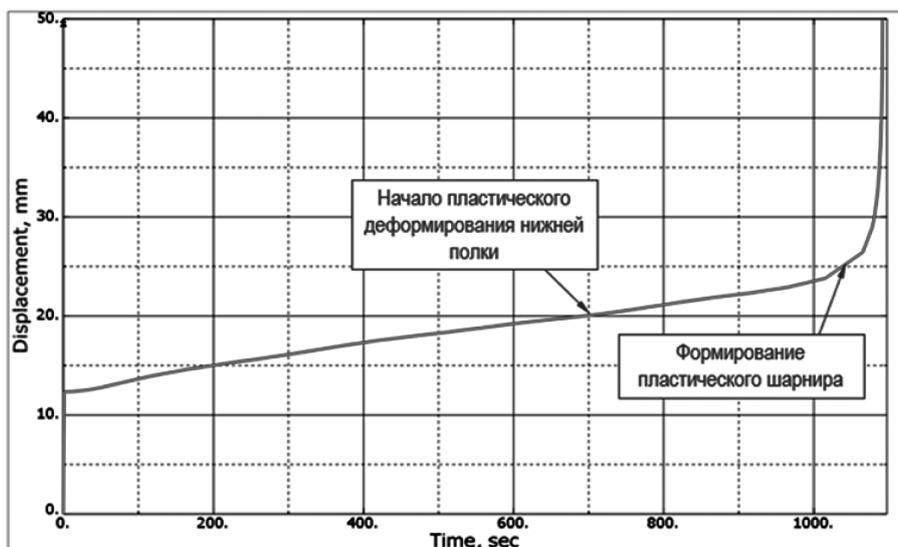


Рис. 4.6. Расчетное значение прогибов центральной части сечения балки при огневом воздействии

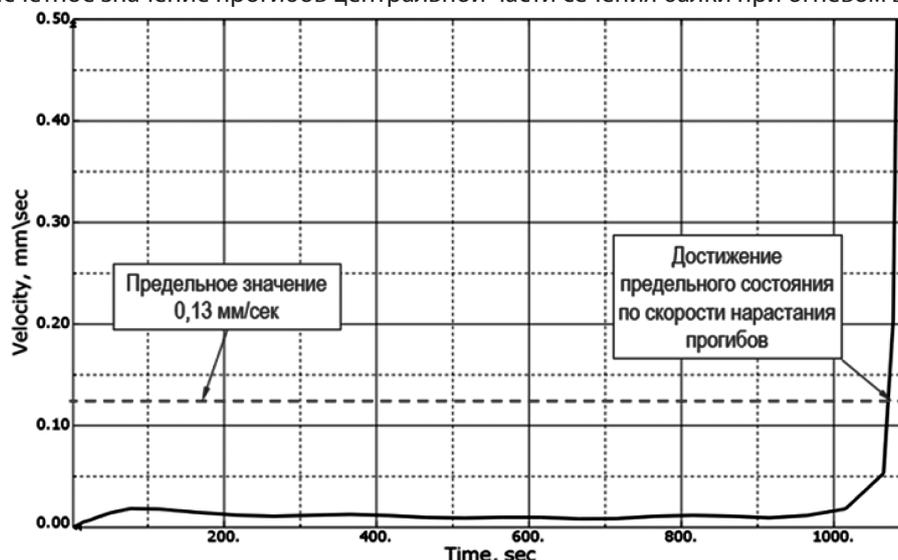


Рис. 4.7. Изменение скорости прогибов центральной части сечения балки в ходе огневого воздействия

Выводы: Найденное авторами расчетное значение потери несущей способности по началу пластического деформирования нижней полки показанного на рис. 4.6 на 12-й минуте (700с), считается пределом огнестойкости конструкции в соответствии с ГОСТ 30247.1-94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость». Однако, авторы обратили внимание, что при продолжении прогрева конструкции после начала пластической деформации на 700 с до 1000 с поведение конструкции было устойчивым, что в дальнейшем можно учесть, как необходимый запас времени до потери устойчивости конструкции. При этом потеря несущей способности испытываемой конструкции произошла при температуре $t=650^{\circ}\text{C}$, при температуре в печи, показанной на рис. 4.4. В этой связи, авторами подтверждается право принимать за критическую температуру не $t=500^{\circ}\text{C}$, а $t=600^{\circ}\text{C}$, что является более точным по-

казателем при определении критической продолжительности пожара для несущих стальных конструкций.

Раздел 5. Разработка модели и алгоритма (блок-схемы) оценки соразмерности требуемого предела огнестойкости несущих строительных конструкций и критической продолжительности пожара в помещении с учетом нового концептуального решения по оценке огнестойкости: «продолжительность пожара = огнестойкость конструкции»

Следующим шагом в вопросе возможности развития риск-ориентированного подхода контрольно-надзорной деятельности может стать «Модель и метод прогнозирования имущественного вреда», которые позволят без выполнения многочисленных расчетных сценариев пожара, на основе параметров пожарной нагрузки, объ-

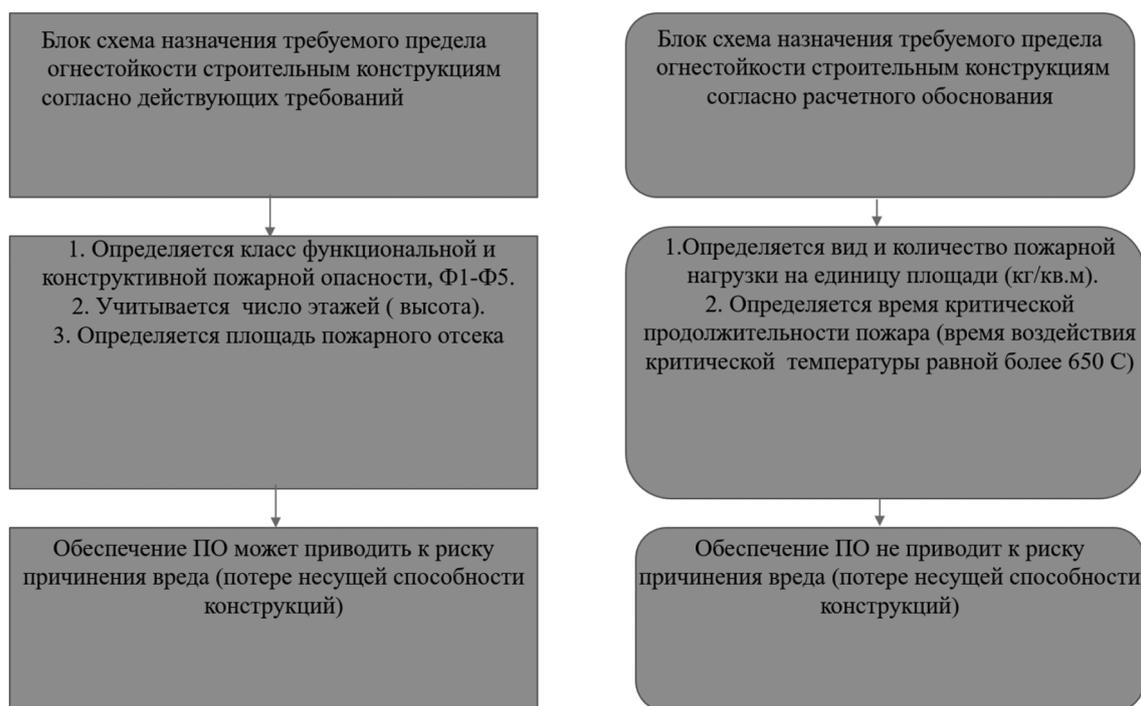


Рис. 5. Блок-схема оценки соразмерности требуемого и фактического предела огнестойкости критической продолжительности пожара

емно-планировочных и конструктивных решений спрогнозировать риск нанесения имущественного вреда, что соответствует задаче исследования №3.

Ниже приведена схема работы системы, предназначенная для выработки управленческого решения с учетом определения фактической степени огнестойкости зданий и сооружений использующая полевой метод расчета критериев опасных факторов пожара (Рис. 5). Данная схема позволяет использовать расчет реального пожара в зданиях любого класса функциональной пожарной опасности.

Новизна и отличие данного алгоритма заключаются в возможности определения требуемой степени огнестойкости с учетом наличия пожарной нагрузки, ее месторасположения в объеме помещения относительно несущих конструкций с учетом свойств материала, из которого выполнена конструкция, и фактической нагрузки, которую данная конструкция воспринимает. Расчет учитывает проверку на устойчивость, что исключает возможность потери несущей способности при температурах, которые не являются для конструкций критическими.

Предложенная авторами блок-схема, предполагает получение множества расчетных данных по критической продолжительности воздействия на несущие конструкции в зависимости от пожарной нагрузки, проемности, высоты и площади помещений, которые будут использоваться для разработки экспресс-оценки кри-

тической продолжительности пожара. При этом оценка соразмерности пределам огнестойкости несущих конструкций, авторами будет решена с учетом запаса прочности конструкций. Таким образом, авторы предполагают разрабатывать новую — эквивалентную информацию, позволяющую оперировать большими объемами информации посредством компактных эквивалентов с минимальными информационными потерями, высокой надежностью [10].

Заключение

1. Информационные риски становятся одной из самых острых проблем современности, когда высокие темпы производства нормативной информации в области пожарной безопасности, значительно опережают темпы ее освоения. В связи с этим опыт работы человека с жизненно важной информацией необходимо рассматривать в контексте адекватности информации проблемным ситуациям, что и пытаются реализовать авторы путем экспресс-оценки пожарных рисков.
2. Соразмерность нормативных требований в области огнестойкости несущих конструкций риску причинения вреда при пожаре может быть реализована по полученным значениям критической продолжительности пожара в результате математического моделирования и эквивалентным им нормативным значениям пределов огнестойкости.
3. Анализ алгоритмов установления нормативными документами пределов огнестойкости несущих

конструкций в зависимости от степени огнестойкости здания, площадей и высот помещений и их функционального назначения, показал, что требования к нормируемым пределам огнестойкости зачастую избыточны, а при применении органами ФГПН вызывает социальную напряженность из-за административных барьеров, и в некоторых случаях недостаточны, что в свою очередь отражается на причинении вреда охраняемым законом ценностям при нормируемой потере несущей способности в случае превышения критической продолжительности пожара, что отражается на привлечении к уголовной ответственности сотрудников органов ФГПН по халатности. Таким образом, интенсивное производство и накопление больших объемов информации создают проблемы информационных перегрузок, снижения надежности профессиональной деятельности и значительного роста числа ошибок, приводящих к трагическим последствиям.

4. Авторами проведено исследование температурного режима пожара в помещении категории В4, при нормативной удельной пожарной нагрузке 180 Мдж/м² (рис.3), которое не выявило критической продолжительности температурного воздействия на конструкции, поскольку температурный

режим достигает 300°C, и не является критическим к стальным несущим конструкциям. В таком случае предъявлять требования к нормированию пределов огнестойкости несущих и ограждающих конструкций для помещений категории В4 по взрывопожарной и пожарной опасности не целесообразно, поскольку это не соразмерно риску причинения вреда охраняемым законом ценностям.

5. Предложенная авторами блок-схема, предполагает получение множества расчетных данных по критической продолжительности воздействия на несущие конструкции в зависимости от пожарной нагрузки, проемности, высоты и площади помещений, которые будут использоваться для разработки экспресс-оценки критической продолжительности пожара. При этом оценка соразмерности пределам огнестойкости несущих конструкций, авторами будет решена с учетом запаса прочности конструкций. Таким образом, авторы предполагают разрабатывать новую — эквивалентную информацию, позволяющую оперировать большими объемами информации посредством компактных эквивалентов с минимальными информационными потерями, высокой надежностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кияткина Е.Н., Лобаев И.А., Кирик Е.С., Воронов С.П. Поддержка принятия управленческих решений при применении обязательных требований соразмерных риску причинения вреда // Сибирский пожарно-спасательный вестник/ Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России. — 2024. — № 2. — С.34–47.
2. Лобаев И.А., Фирсова Т.Ф., Кравченко А.Б. «К вопросу о соразмерности нормативных требований по огнестойкости несущих конструкций риску причинения вреда охраняемым законом ценностям» //Материалы тридцать второй международной научно-технической конференции «Системы безопасности — 2023». — М.: Академия ГПС МЧС России, 2023. 553 с// 450–456 с.
3. Козлачков В.И., Лобаев И.А. Экспресс-оценка пожарных рисков при изменении функционального назначения зданий. — М.: ВНИИТИ РАН, Деп. № 2325-V2001 от 08.11.2001 г.
4. Серков Б.Б. Здания и сооружения. Часть 1. Конструкции, материалы, преграды: Учебник / Б.Б. Серков, Т.Ф. Фирсова. — Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2019. — 176 с. — (Пожарная безопасность). — ISBN 978-5-907064-62-1. — EDN VYBDDC. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37213715>.
5. Гураль А.А., Фирсова Т.Ф. Исследование свойств строительных конструкций// Гражданская оборона на страже мира и безопасности: Материалы III Международной научно-практической конференции, посвященной Всемирному дню гражданской обороны. В 3-х частях, Москва, 01 марта 2019 года. Том Часть II. — Москва: Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2019. — С. 100–104. — EDN DTISTV. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41286441>.
6. Ройтман В.М., Фирсова Т.Ф. Необоснованное завышение требований норм и СТУ по пределам огнестойкости ряда конструкций высотных зданий // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2017. № 2. С. 59–62. DOI: 10.25257/FE.2017.2.59-62.
7. Мешалкин Е.А., Болодьян Г.И., Истратов Р.Н. Специализированные здания для маломобильных групп населения: новации в противопожарных требованиях. ж. «Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация». — 2021. — №23. — С. 46–52. DOI 10.25257/FE.2021.2.46-52.
8. Бордаков В.Н., Мешалкин Е.А., Болодьян Г.И. Исследование процесса тушения модельных очагов пожара. Ж. «Безопасность труда в промышленности», 2021, №9, — с.57–62. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-9-57-62. УДК 614.845.2.
9. Иванов В.Н. Комплексный подход к определению требуемых пределов огнестойкости высотных жилых зданий // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2018. № 1. С. 28–38. DOI: 10.25257/FE.2018.1.28-38.
10. Лобаев И.А., Плешаков В.В. Особенности применения требований пожарной безопасности в условиях риск-ориентированной модели деятельности// Пожары и чрезвычайные ситуации: предупреждение, ликвидация. 2023 №2. С.121–130. DOI: 10.25257/FE.2023.2.121-1305.

ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧЕЛОВЕКА С РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ В ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ПРОЦЕССЕ

FEATURES OF HUMAN INTERACTION WITH A ROBOTIC SYSTEM IN THE PRODUCTION PROCESS

**V. Medunetsky
M. Serzhantova**

Summary. The article briefly considers the assembly and assembly process module, which provides technological flexibility in the assembly of products. It is noted that to further increase technological flexibility in small-scale production of products, a human specialist should be introduced into the assembly process by this technological module. It is noted that there is a need to evaluate the performance of a human specialist to reduce the likelihood of erroneous actions on his part. The article provides mathematical dependencies that allow us to evaluate the change in the performance of a human specialist during the daily production cycle.

Keywords: assembly and assembly process module, technological flexibility, performance of a human specialist in the technological process.

Медунецкий Виктор Михайлович

доктор технических наук, профессор,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения
vm57med@yandex.ru

Сержантова Майя Вячеславовна

кандидат технических наук, доцент,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения
xyz43210@mail.ru

Аннотация. В статье кратко рассмотрен сборочно-комплектующий технологический модуль, который обеспечивает технологическую гибкость при сборке изделий. Отмечается, что для дополнительного повышения технологической гибкости при мелкосерийном производстве изделий следует в процесс сборки данным технологическим модулем ввести человека-специалиста. При этом отмечается, что возникает необходимость оценивать работоспособность человека-специалиста с целью снижения вероятности возникновения ошибочных действий с его стороны. В статье приводятся математические зависимости, которые позволяют оценивать изменение работоспособности человека-специалиста в течение дневного производственного цикла.

Ключевые слова: сборочно-комплектующий технологический модуль, технологическая гибкость, работоспособность человека-специалиста в технологическом процессе.

Современное промышленное производство многогранно и непрерывно претерпевает изменения относительно потребностей общества. В настоящее время при массовом и крупносерийном производстве всё также распространена автоматизация и роботизация при изготовлении изделий. Для повышения эффективности производственных процессов сейчас активно внедряются технологии цифровых двойников, искусственный интеллект, интернет вещей и облачные вычисления. На практике также достаточно широко используются сформированные базы данных и базы знаний, что позволяет качественно конструировать изделия и обеспечивать технологическую подготовку производства для их дальнейшего изготовления. При этом роль человека в производстве сводится в основном к разработке программного обеспечения конкретного технологического процесса и настройки собственно производственно-технологического процесса (пуско-наладочные работы).

Все эти тенденции не обошли стороной и серийные и мелкосерийные производства малогабаритных изделий. Однако, следует отметить, что в этой серийной об-

ласти имеется определённая специфика. В некоторых технических сферах возникает потребность в различных модификациях основного изделия по требованиям заказчиков при небольших партиях их изготовления. К примеру, это сейчас особенно актуально в сборочно-комплектующих производствах, так как сборочные операции значительно влияют на технико-экономические показатели изделий [1, 2].

Поэтому возникает потребность в так называемой технологической гибкости производства, под которой принято понимать способность перехода с изготовления одного вида изделия на другой с минимальными изменениями технического оборудования. В частности, варианты обеспечения технологической гибкости подробно рассмотрены в работе [3]. Дальнейшее развитие этой темы, к примеру, представлено в работе [4], где предложен и рассмотрен сборочный технологический модуль, который повышает технологическую гибкость сборочной роботизированной линии. В основе этого модуля лежит компактная круговая распределительная система, которая обеспечивает передачу деталей для

сборки и частично собранные изделия от одного робота к другому в любых сочетаниях для соответствующих сборочных операций, а роботы расположены по окружности относительно данной распределительной системы. При этом следует отметить, что каждый манипулятор робота оснащён своим захватным устройством определённого типа. Основу распределительной системы представляет двухуровневый круговой стол, который состоит из двух подвижных частей с возможностью поворота каждой части относительно своей оси. В верхней части стола имеются проёмы (окна) для доступа манипуляторов к нижней части.

Такая компоновка сборочно-комплектующего модуля обеспечивает технологическую гибкость, то есть возможность эффективного перехода от сборки одного изделия к другому при минимальных комплексных затратах.

Если взять за основу такой сборочно-комплектующий технологический модуль, то можно ещё больше (дополнительно) повысить его технологическую гибкость, если ввести в этот технологический процесс человека-специалиста по сборке. Он также должен выполнять некоторые сборочные операции в данной технологической цепочке и выполняет те технологические операции, которые роботы, имеющие определённые захватные устройства, не могут выполнить при сборке какого-либо модифицированного изделия. Кроме того, для некоторых сборочных операций следует использовать какие-либо приспособления, которыми можно оснастить рабочее место человека-специалиста. При этом обеспечивается его взаимодействие с роботами через распределительную систему. Таким образом, получается комбинированная технологическая система взаимодействия человека с техническими «интеллектуальными» устройствами (оборудованием).

Исходя из вышеизложенного, возникает проблема обеспечения надёжности функционирования такой технологической системы и проблема работоспособности человека, который непосредственно участвует в этой системе.

Эти проблемы также подсказаны нынешним состоянием теории и практики эксплуатации современных сложных управляющих комплексов, встраиваемых в техническую среду технологических процессов, дополненную фактором наличия в ее составе человека-специалиста. Известно, что многие российские и зарубежные исследователи в той или иной мере рассматривают это направление [5, 6, 7]. Тенденция усложнения функций динамических систем приводит к соответствующим требованиям, обязательным условием которой является обеспечение их устойчивости, а также инвариантности качества производимой продукции относительно из-

меняющихся сигнальных и параметрических условий. Это породило потребность в исследовании особенности взаимодействия человека с робототехнической системой в производственном процессе. Следует отметить, что проблема взаимодействия человека с робототехнической системой как «системная парадигма» появилась в последние годы и еще окончательно не оформилась, и это несмотря на очевидный факт, что всё с течением времени меняет свои показатели работоспособности и надёжности. Проблема контроля работоспособности технических систем заметно усложняется, если в их составе присутствует человек-специалист [8]. Это усложнение связано с двумя факторами, первый из них порождается трудностью математической формализации его поведенческой деятельности, второй — возможной непредсказуемостью его поведения в определенных условиях функционирования. Последний фактор наглядно проявляется в сложных ситуациях, являющихся экстремальным проявлением частичной потери работоспособности и обычно именуемое термином «человеческий фактор».

Следует также отметить, что любая техническая антропогенная система, созданная интеллектом и непосредственно руками человека, характеризуется четырьмя стадиями существования. Первая стадия есть стадия разработки, которая создается в модельной информационной и алгоритмической среде. Вторая стадия представляет собой производство. Третья стадия — эксплуатация в составе обслуживаемого технологического процесса. Четвёртая стадия — утилизация. Задача контроля технической работоспособности особенно актуальна для первой и третьей стадий ее существования. На первой стадии в рамках системной парадигмы сложных динамических систем решается задача оценки априорной потери надёжности. На третьей стадии решается задача эксплуатационной оценки возможного его вырождения. Предпринятые авторами данной статьи исследования в своей теоретической части сориентированы на задачу контроля уровня физической работоспособности человека-специалиста в составе технологического процесса. Результаты исследования в основном направлены на рекомендации по организации технологической среды функционирования человека-специалиста и формирования команд из специалистов в случае, если технологический процесс требует коллективного обслуживания.

Приходится отметить, что состояние проблемы априорного контроля особенностей взаимодействия человека с робототехнической системой в технологическом процессе и контроля уровня его физической работоспособности на настоящий момент не полностью разработан. Отсутствует адекватный инструментарий аналитической количественной оценки. Разработке аналитического инструментария априорного контроля возможной работоспособности робототехнической си-

стемы в производственном процессе с учетом фактора наличия в их составе человека-специалиста в условиях интервального модельного представления функциональных компонентов производственного процесса посвящены предпринятые авторами исследования, положенные в основу данной статьи.

Робототехническая система с человеком-оператором в технологическом процессе может быть представлена линейным математическим оператор отображающим пространство целевых намерений в пространство осуществляемых реализаций. В математической постановке линейный оператор становится вырожденным [9], если размерности указанных пространств оказываются не согласованными, и эта несогласованность проявляется в уменьшении ранга линейного математического оператора. Следует заметить, что использование уменьшения ранга оператора отношения «вход — выход» системы в качестве показателя изменения физической работоспособности вырождения неудобно, так как ранг является целочисленной характеристикой матрицы, а потому характер его изменения является разрывным. Предлагается характеристикой в классе непрерывных использовать число обусловленности на основе семейства функционалов математического вырождения, вычисляемых на спектре сингулярных чисел матрицы линейного математического оператора именуемой критериальной.

Любая система может терять общую работоспособность, когда из ее состава выпадает некоторый функциональный элемент. Как следствие, сокращается размерность пространства осуществляемых реализаций. Причины изменения работоспособности могут носить организационный характер, когда формируемые целевые намерения неудачно распределяются по входам сложной динамической системы. Терять работоспособность могут системы по причине параметрической природы, когда неудачно организованы связи между каналами системы, неудачно назначены по знаку и величине коэффициенты передачи этих связей, когда неудачно сформированы полосы пропускания каналов, а в случае, если система имеет дискретную природу, неудачно назначены и распределены по каналам интервалы дискретности и т.д.

Низкий уровень общей работоспособности может стать следствием организации процессов в многоканальной динамической системе с человеком-специалистом в ее составе с функциональными компонентами, функционирующие в дискретном по времени режиме. Если каналы системы функционируют с интервалами дискретности, не согласованными с их полосой пропускания, то возникает опасность не только потери работоспособности, но и разрушения такой многоканальной системы.

И наконец, робототехнические системы с человеком-специалистом в их составе могут изменять свои показатели работоспособности по причине негативно проявляющегося человеческого фактора, которую можно разделить на два типа: внутреннюю и внешнюю.

К внутренним причинам негативного человеческого фактора в рассматриваемой системе можно отнести: а) эмоциональное состояние человека на момент выхода его на работу и в течение рабочей смены, которое в системной постановке проявляется как ненулевое начальное состояние, порождаемое надпроизводственной средой, и отражается в виде неполного погружения его в процесс производственного функционирования; б) несобранность и неадекватная оценка ситуации; в) поведенческие особенности личности, его темперамент. К внешним причинам негативного человеческого фактора можно отнести: возникновение несанкционированных производственных бинарных отношений, несовершенство организации труда на производстве.

Оценка работоспособности как пользовательский показатель производственной системы, может осуществляться как в переходном, так и установившемся режимах функционирования системы, при этом наибольшее предпочтение следует отдать задаче контроля в установившемся режиме. Задача контроля работоспособности в априорной постановке в основном решается в классе аналитических соотношений, на основе критериальных матриц, сконструированных для отношения «вход-выход». Используемый инструментальный аппарат функционалов вырождения позволяет дать численную оценку близости системы к частичной или полной потере работоспособности при наличии критериальной матрицы, достаточно адекватно описывающей системный характер отношения «вход-выход» исследуемой системы.

Особенность и специфика взаимодействия человека с указанной выше робототехнической системой заключается в том, что при выполнении соответствующих технологических операций человек-специалист должен обладать соответствующей физической работоспособностью в течение заданного рабочего времени (производственного цикла).

Поэтому необходимо оценивать уровень работоспособности человека в течение производственного цикла с целью снижения вероятности возникновения ошибочных действий с его стороны.

Процесс изменения уровня работоспособности человека можно представить в виде обобщенной функции:

$$\eta(w) = N(w)\chi(w), \quad (1)$$

где: $N(w)$ — оценочная матрица системы «человек — технологический процесс», размерностью $m \times m$, в ко-

торой переменная w является временем, когда задача (1) решается для непрерывного времени, и дискретным временем k с числом интервалов дискретности длительностью Δt ;

$\eta(w), \chi(w)$ — m -мерные векторы, отметим, что $\chi(w)$ может быть равна $\chi(0)$.

Для наблюдения за изменением работоспособности системы взаимодействия человека с технической системой применим функционалы J_R , построенные на сингулярных числах $\alpha_j (j = \overline{1, m})$ оценочной матрицы N , таким образом

$$\begin{aligned} \sigma_\alpha \{N\} &= \{\alpha_j = |\mu_j^{1/2}|\}; \\ \mu &: \det(\mu I - N^T N) = 0; j = \overline{1, m} \end{aligned} \quad (2)$$

и соответствует соотношению

$$J_R = \alpha_v / \alpha_1; v = \overline{m, 1} \quad (3)$$

Выражение (3) позволяет оценивать уровень работоспособности во времени благодаря возможности наблюдения за изменениями значений оценочной матрицы. Отметим, что J_R задаются на интервале

$$0 \leq J_{Dv} \leq 1 \quad (4)$$

что делает их удобным инструментом для оценки работоспособности человека в производственном цикле.

Предположим, наличие форсирующих свойств у человека и сформируем передаточную функцию его работоспособности

$$[W_3(s)] = [k_3] \left[\frac{[T_{33}]s + 1}{([T_{31}]s + 1)^\mu} - \frac{1}{([T_{32}]s + 1)^v} \right] \cdot \frac{1}{s}, \quad (5)$$

где $[k_3]$ — интервальный коэффициент персонализированной производительности; $[T_{31}]$ — интервальная постоянная времени нарастания работоспособности в производственном цикле, степень μ формирует задержку роста работоспособности в начале цикла; $[T_{32}]$ — интервальная постоянная времени описывающая снижение работоспособности; $1/s$ — интегрирующее звено отражает результат выполнения человеком–оператором технологического задания по управлению системой в ручном режиме. Интервальная постоянная времени $[T_{33}]$, формирует форсирующие свойства человека [5].

В результате: на основе зависимости (5), в общем и целом, получено изменение уровня работоспособности человека в рамках производственного цикла, которое представлено в Таблице 1 и приводится на графике для наглядности (на Рис.1)

Таблица 1.

Работоспособность человека в производственном цикле

П.ц., час	0	1	2	3	4	5	6	7	8
R, у.е.	1.0	1.18	1.20	1.30	1.25	1.23	1.1	1.0	0.9

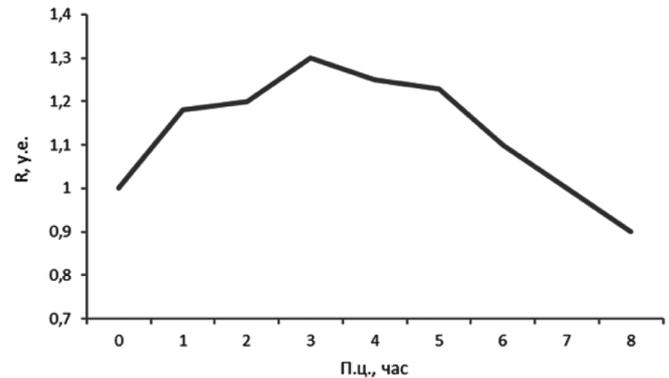


Рис. 1. График изменения уровня работоспособности человека в производственном цикле

В таблице 1 и на графике на Рис.1: П.ц. — производственный цикл в часах, R, у.е. — уровень работоспособности в условных единицах. Из содержания приведённой таблицы и графика видно, что в начале производственного цикла уровень работоспособности человека условно можно принять как 1, а далее с течением времени уровень работоспособности человека повышается и достигает максимума — 1,3. После достижения максимума начинается постепенный спад до исходного уровня и далее к окончанию выполняемых сборочных операций отмечается уровень работоспособности человека 0,9.

Таким образом, можно предположить, что в диапазоне третьего и четвертого часов производственного цикла вероятность ошибочных действий человека-сборщика минимальна, а к окончанию производственного цикла — максимальна. Поэтому для человека-сборщика во второй половине дневного производственного цикла (рабочего дня) необходимо предусматривать и распределять ему задания таким образом, чтобы снижать интенсивность его труда.

Дополнительно в качестве иллюстрации (Рис. 2) по приведенной далее последовательности зависимостей (б) можно графически представить процесс уменьшения работоспособности человека с максимального значения. В исходном виде — это окружность, а далее эта окружность трансформируется в эллипс с последовательным изменением его параметров, что соответствует уменьшению уровня работоспособности человека и конкретизирует этот процесс.

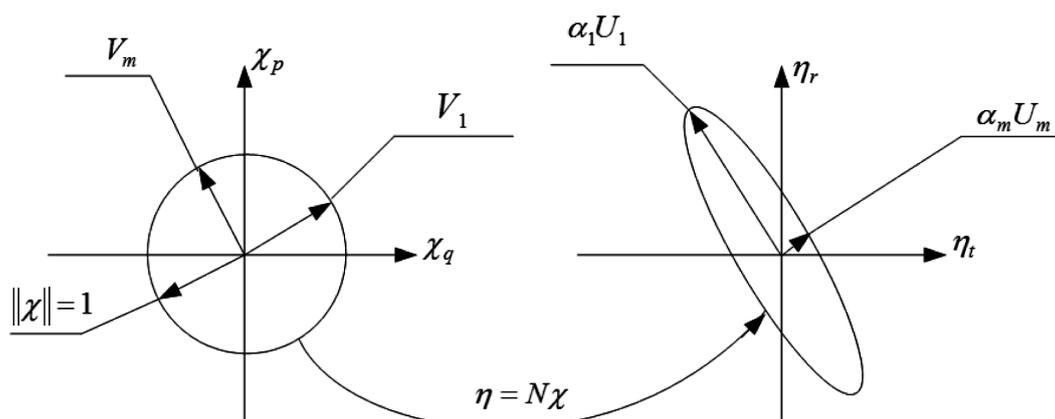


Рис. 2. Геометрическая иллюстрация уменьшения уровня работоспособности человека с максимального значения до минимального

$$\eta = N\chi = \sum_{j=1}^m \gamma_j N V_j = \sum_{j=1}^m \gamma_j \alpha_j U_j \Rightarrow \begin{cases} \eta = \alpha_1 U_1 & \text{при } \chi = V_1 \\ \eta = \alpha_m U_m & \text{при } \chi = V_m \end{cases} \quad (6)$$

Вывод

В результате данного исследования по повышению технологической гибкости производства выявлена осо-

бенность и специфика взаимодействия человека с робототехнической системой на основе предложенных математических моделей. Выявлено, что уровень работоспособности человека следует учитывать в течение производственного цикла, в частности при сборочно-комплектующих технологических операциях малогабаритных изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козырев Ю.Г. Гибкие производственные системы. Справочник. Справочное издание, М., изд-во КНОРУС, 2022 г. — С.364.
2. Пономаренко М.В. Автоматизированные системы управления производством с точки зрения гибких производственных систем. Современное машиностроение: Наука и образование. Материалы 12-й Международной конференции под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича, СПб: Политех-пресс, 2023 г.
3. Николаев В.В. Повышение гибкости роботизированных сборочных линий многономенклатурного производства оптических приборов: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО. СПб., 2018 [Электронный ресурс]. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_008700118/, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 26.08.2024).
4. Медунецкий В.М., Медунецкий В.В., Соляник А.Р., Ярышева Е.П. Обеспечение гибкости роботизированных технологических систем для сборки малогабаритных изделий. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 1. С. 143–146. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-1-143-146
5. Roco M., Bainbridge W. (eds). *Converging Technologies for Improving Human Performance: Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science*. Arlington, 2004.
6. Ястреб Н.А. Гуманитарная экспертиза конвергентных технологий как философская задача // Человек в техносреде: конвергентные технологии, глобальные сети, Интернет вещей. Сборник научных статей. Выпуск 1. Под ред. доц. Н.А. Ястреб. — Вологда.: ВоГУ, 2014. С. 188–195.
7. Швецова В.И. Современные методы оценки комфортности биоклиматических условий курортных местностей // Системы контроля окружающей среды. 2021. Вып. 1 (43). С. 147–153.
8. Ушаков А.В., Сержантова М.В. Интервальная аддитивная кусочно-полиномиальная временная модель деятельности человека-оператора в квазистатической функциональной среде // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. №2., С.329–337
9. Гантмахер Ф.Н. Теория матриц. М.: Наука — 1966 г. — 576 С.

© Медунецкий Виктор Михайлович (vm57med@yandex.ru); Сержантова Майя Вячеславовна (xyz43210@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ ПОДГОТОВКИ К ОЛИМПИАДАМ НА ОСНОВЕ БОЛЬШИХ ДАННЫХ

ARCHITECTURE OF AN OLYMPIAD PREPARATION SYSTEM BASED ON BIG DATA

M. Nuyakshin

Summary. This article presents the architecture of an adaptive system for preparing students for mathematics Olympiads, which personalizes the educational process based on big data analysis and cognitive modeling methods. Using accumulated learning data for each student, the system dynamically adapts educational content by applying machine learning methods (clustering and classification) to segment students and select optimal learning trajectories. The integration of AI for solution verification, including NLP algorithms and the cognitive architecture ACT-R, enables personalized feedback. The article also explores the possibility of integrating this system with external educational platforms.

Keywords: adaptive learning, cognitive models, ACT-R, machine learning, personalized learning process, data analysis in education, feedback, class diagram.

Нуйакшин Михаил Геннадьевич

*Аспирант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Государственный Университет «Дубна»
mihail.nuyakshin@mail.ru*

Аннотация. В статье представлена архитектура адаптивной системы для подготовки к математическим олимпиадам, которая персонализирует образовательный процесс на основе методов анализа больших данных и когнитивного моделирования. Используя накопленные данные о результатах обучения каждого обучающегося система гибко адаптирует учебный контент, применяя методы машинного обучения (кластеризация и классификация) для сегментации учащихся и выбора оптимальной траектории обучения. Интеграция ИИ для проверки решений, включая алгоритмы NLP и когнитивную архитектуру ACT-R позволяет организовать персонализированную обратную связь. В статье рассматривается возможность интеграции с внешними образовательными платформами.

Ключевые слова: адаптивное обучение, когнитивные модели, ACT-R, машинное обучение, персонализация учебного процесса, анализ данных в обучении, обратная связь диаграмма классов.

Введение

Искусственный интеллект открыл новые горизонты в образовании. Благодаря алгоритмам машинного обучения и анализу данных инструменты на базе ИИ персонализируют образование и обеспечивают индивидуальное обучение, немедленную обратную связь и адаптивные оценки, оптимизируя процесс обучения для каждого ученика. Система подготовки учащихся к олимпиадам требует учета индивидуальных способностей и навыков каждого ученика, что возможно благодаря использованию технологий больших данных. Технологии ИИ и машинного обучения позволяют собирать и анализировать данные о результатах обучения, адаптируя образовательные платформы к потребностям учащихся.

В статье [1] сделан подробный обзор современных методов анализа данных для персонализации образовательного процесса. Рассмотрены подходы к адаптации обучения с помощью технологий больших данных, включая возможности рекомендаций, диагностику знаний, анализ прогресса обучения, а также когнитивные карты.

Результаты педагогических экспериментов по обучению математике показали явное преимущество группировки обучающихся по способностям по сравнению с традиционным обучением всего класса. Еще большее

преимущество продемонстрировала полностью персонализированная модель по сравнению с группировкой по способностям для успеваемости учащихся [2].

Одной из наиболее распространенных форм персонализации в цифровых учебных средах является адаптация учебных материалов в соответствии со «стилем обучения» учащегося [3,4].

Другие стратегии персонализации включают настройку учебного процесса с учётом интеллектуальных особенностей пользователя, его предпочтений в медиа-форматах (текст, аудио или видео форматы), уже имеющихся знаний или уровня мотивации. Как правило, адаптация основывается на первоначальной оценке этих характеристик, которая помогает распределить учащихся по нескольким группам, чтобы предложить наилучший подход к обучению для каждой категории [5,6].

Цель статьи: разработка архитектуры системы, использующей методы больших данных для персонализации подготовки к математическим олимпиадам школьников.

1. Индивидуальные характеристики обучающихся

Для создания адаптивного обучения используются различные характеристики обучаемых, которые помогают персонализировать образовательные стратегии.

Таблица 1.

Индивидуальные характеристики обучающихся

Название характеристики	Краткое описание	Эффективность для адаптации	Недостатки (сложность выявления)	Эффективность применения (1-5)
Когнитивные способности и стиль мышления	Уровень восприятия, скорость обработки информации, аналитическое или творческое мышление	Высокая, позволяет подбирать сложность и стиль материалов	Требует глубокого тестирования и анализа	5
Учебные предпочтения и стиль обучения	Предпочтение визуальных, аудиальных, кинестетических форматов обучения	Высокая, помогает выбрать формат подачи информации	Нужно учитывать предпочтения в нескольких категориях (видео, текст и т.д.)	5
Предыдущие знания и опыт	Имеющиеся знания и опыт в изучаемом предмете.	Высокая, обеспечивает адаптацию сложности материалов	Требует диагностических тестов для точного определения уровня знаний	5
Мотивация и уровень вовлечённости	Желание и стремление к обучению, уровень вовлечённости в процесс	Средняя, позволяет корректировать уровень нагрузки и методы подачи	Может быть трудно объективно измерить мотивацию и вовлечённость	4
Цели обучения	Конкретные цели обучения. Например, подготовка к экзаменам или общее развитие	Средняя, определяет направленность учебного процесса	Сложно оценить без четкой информации от самого учащегося	4
Эмоциональное состояние	Эмоциональное состояние, стрессы, готовность к обучению	Средняя, позволяет регулировать темп и мотивационные стратегии	Требует постоянного мониторинга состояния учащегося	3
Скорость обучения	Способность быстро или медленно усваивать новый материал	Высокая, адаптирует темп подачи информации	Трудно определить оптимальный темп без длительного наблюдения	5
Физические и сенсорные особенности	Наличие ограничений, таких как слабое зрение, слух или двигательные навыки	Высокая, требует специальных интерфейсов и адаптаций	Требует индивидуальных решений и ресурсов	4

Наиболее часто используемые характеристики показаны в таблице 1.

В последней колонке указаны экспертная оценка эффективности применения каждой характеристики, которая была составлена по оценкам мнений 5 экспертов (преподавателей). Наибольшая эффективность оценивалась в 5 баллов.

Анализ таблицы показал, что для проектирования архитектуры адаптивной системы подготовки к олимпиадам целесообразно выбрать наиболее эффективные характеристики обучающихся:

1. Когнитивные способности и стиль мышления, которые учитывают личные особенности в восприятии и обработке информации. Это даст возможность адаптировать сложность и форму учебных материалов для максимальной эффективности обучения [7,8].
2. Выявление учебных предпочтений и стиля обучения способствует повышению уровня вовлеченности учащегося и эффективности образова-

тельного процесса за счет улучшения восприятия учебных материалов [9,10].

3. Предыдущие знания и опыт обучающихся позволяют корректировать содержание обучения в соответствии с их уровнем подготовки, предлагать материалы соответствующей сложности для достижения высокой эффективности обучения.
4. Скорость обучения позволяет регулировать темп обучения и обеспечить продвижение обучающегося, избегая как чрезмерной нагрузки, так и ненужных задержек.

2. Анализ требований к функциональности системы

В результате анализа были определены основные требования к функционалу разрабатываемой системы. Важнейшими из них являются следующие: генерация задач, адаптация уровня сложности, проверка ответов и решений, предоставление обратной связи.

Система должна иметь возможность генерировать уникальные задачи, используя типовые шаблоны и учи-

тывая заданные параметры и ограничения. Далее, система должна обладать функцией адаптации уровня сложности задач в соответствии с успеваемостью ученика, его текущими знаниями и показателям развития. Также важно, чтобы система осуществляла проверку не только правильности ответов, представленных учениками, но и проверку соответствия хода решений учащихся в соответствии с заданными методиками. Наконец, система должна предоставлять обучающимся качественную обратную связь, включающую оценку и подробные комментарии по выполненным заданиям. Все это позволит ученикам адекватно осознать допущенные ошибки и работать над улучшением своих навыков.

Рассмотрим методы проверки решений, которые могут быть применены в системе подготовки школьников к олимпиадам.

1. Метод проверки с помощью искусственного интеллекта (ИИ), в котором система генерирует пошаговый план решения задачи и сопоставляет его с текстом, предоставленным учеником, используя методы ИИ. Для сравнения шага решения с шагами, представленными учеником, применяются алгоритмы обработки естественного языка, такие как BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers). Этот подход позволяет системе учитывать вариативность формулировок и даже распознавать корректные, но альтернативные пути решения задачи [11,12]. Это позволяет учитывать возможные различия в формулировках, даже если ученик использовал иной, но верный подход. Это обеспечивает гибкость в интерпретации шагов решения и учитывает креативные подходы к выполнению задачи.
2. Проверка с использованием когнитивной архитектуры АСТ-R (Adaptive Control of Thought—Rational), которая моделирует процесс решения задачи на основе выбранной методики [13]. В отличие от других когнитивных моделей, АСТ-R может учитывать краткосрочную и долговременную память, а также когнитивную нагрузку, что позволяет системе подстраивать сложность задач и поддерживать учащегося на каждом этапе. Сопоставляя действия ученика с моделью, система прогнозирует, какие шаги ученик должен был пройти мысленно для достижения правильного ответа. После выполнения задач учеником система может выявить отклонения от правильного решения и предложить коррекцию или объяснение ошибки [14]. Этот метод позволяет оценить не только конечное решение, но и когнитивные процессы, лежащие в основе мышления обучаемого, что помогает анализировать его логические и аналитические навыки.
3. Метод пошаговой сверки на основе дерева решений (Decision Tree Matching), которое система

строит для каждого возможного способа решения задачи. По мере выполнения задачи действия ученика проверяются через это дерево для выявления отклонений от predetermined алгоритма. Пошаговая сверка с помощью дерева решений помогает системно проверять действия учащегося, выявляя точный момент и характер отклонения от методики. Метод деревьев решений может использоваться для предсказания и анализа учебных достижений студентов [15,16].

3. Архитектура системы подготовки к олимпиадам

На основании выявленных требований к функциональности предложена следующая архитектура системы:

1. Система должна быть разработана в виде распределенного монолита на основе Onion Architecture [17] с выделенными слоями бизнес-процессов, преобразования данных и представления данных. Это обеспечивает строгую сегментацию ответственности и хорошую модульность системы, облегчает последующее разделение на микросервисы при необходимости масштабирования и адаптации для коммерческого использования.

Предлагается выделить следующие сервисы:

- Сервис управления задачами для генерации и сохранения типовых задач, а также определения уровня сложности и граничных условий.
- Сервис проверки решений, предоставленных учащимися, на основе применения технологий искусственного интеллекта (ИИ), когнитивных моделей АСТ-R или деревьев решений.
- Сервис управления пользователями для хранения данных учащихся и преподавателей, управления доступом к системе и обеспечения безопасности.

В ходе исследования были выделены наиболее значимые агрегаты для систематизации и упорядочивания данных [18,19].

- *Агрегат учебных материалов*, включающий темы, разделы и подразделы, формирующие логическую и иерархическую структуру учебного контента, что обеспечивает его целостность.
- *Агрегат задач и методических материалов*, объединяющий типовые задачи, методики их решения, конкретные задания и граничные условия переменных, что упрощает процесс генерации и анализа задач благодаря их внутренней логической связи.
- *Агрегат пользователей*, охватывающий информацию о пользователях, учащихся и преподавателях, что способствует более эффективной системе идентификации и управления доступом, а также обеспечения сохранности персональных данных.
- *Агрегат результатов*, содержащий данные о выполнении задач и изучении подразделов, позво-

ляющий отслеживать прогресс учащихся и анализировать их успеваемость.

- *Агрегат аналитики*, включающий методы оценки успеваемости и проведения аналитического анализа. Он предоставляет инструменты для гибкой настройки и модификации алгоритмов оценки и адаптации образовательного процесса.
2. Машина управления состояниями (математическая модель вычислений, используемая для описания последовательности действий в системе) будет использоваться для мониторинга прогресса обучающихся и адаптации уровня сложности учебного материала к их индивидуальным потребностям. Каждый обучающийся имеет персональный учебный трек, который отображает текущую степень сложности, результаты выполненных заданий и общее количество достигнутых результатов. Такой подход позволяет осуществлять гибкую адаптацию образовательного процесса. Информация о прогрессе каждого учащегося хранится в формате хронологии выполненных заданий и собранных достижений, что обеспечивает системе возможность отслеживания развития умений и навыков, выявления сильных и слабых сторон в знаниях, а также мониторинга изменений в процессе обучения. Эта методология способствует повышению мотивации обучающихся, оптимизации временных затрат на обучение и улучшению успеваемости за счет индивидуального подхода к обучению, учитывающего когнитивные особенности и специфические потребности каждого ученика.
 3. Применение технологий искусственного интеллекта (NLP) и методов когнитивного моделирования (ACT-R), для анализа решений, предложенных учащимися, позволит реализовать индивидуальный подход к оценке решений с учетом креативности учащихся и выявления пробелов в знаниях.
 4. Веб-интерфейс данной системы будет организован таким образом, чтобы разграничить функционал для учащихся и для преподавателей. Учащиеся получают доступ к функциям просмотра заданий, отслеживания своего прогресса в обучении и получения обратной связи. Преподаватели, в свою очередь, смогут создавать задания, проводить их оценку и мониторинг успеваемости учащихся.

4. Диаграмма классов системы

На основе анализа требований и предложенной архитектуры была разработана диаграмма классов для системы подготовки к олимпиадам. Иерархически структурированная система включает классы пользователей, учебных материалов, в том числе тем, разделов, подразделов, а также классы, предназначенные для отслеживания и оценки результатов обучения.

В рамках этой системы класс «Пользователь» выступает в качестве базового, определяя общие атрибуты всех пользователей, такие как фамилия, имя, отчество, контактные данные, логин и пароль. От данного класса наследуются подклассы «Учащийся» и «Преподаватель».

Класс «Учащийся» характеризуется дополнительными атрибутами номера школы и класса и предоставляет возможность просмотра результатов обучения, а класс «Преподаватель» характеризует специализацию и категорию преподавателя, предоставляет ему право на создание заданий и просмотр результатов учащихся.

Классы «Тема», «Раздел» и «Подраздел» формируют структуру учебных материалов, обеспечивая их иерархическую организацию и связывание теоретического материала с задачами. Шаблон «Типовая задача» используется для генерации конкретных заданий, включая параметры условий, ответы, уровень сложности и методике решения, представленную классом «Методика решения».

Классы «Результаты решения задач» и «Результаты изучения подразделов» фиксируют соответственно данные о попытках решения конкретных заданий и прогресс учащегося по темам и разделам, включая текущий уровень освоения материала и количество решенных задач.

Класс «Задача» как конкретный экземпляр, сгенерированный из типовой задачи, позволяет автоматически проверять ответы ученика с использованием заранее определенной методики решения. Взаимосвязь между «Типовой задачей», «Методикой решения» и параметрами генерации задачи, такими как «Граничное условие переменных», управляет процессом создания заданий и их решением.

Таким образом, предложенная структура системы и взаимосвязи между классами обеспечивают комплексный подход к обучению и подготовке учащихся к олимпиадам, позволяя адаптировать учебный процесс под индивидуальные потребности и способности каждого ученика.

5. Адаптивное обучение на основе анализа данных

Образовательная стратегия, использующая адаптацию к индивидуальным когнитивным особенностям учащихся на основе анализа данных и когнитивного моделирования ACT-R, является перспективным методом улучшения качества обучения. Одной из важных составляющих является сбор и анализ данных о когнитивных характеристиках ученика, что позволяет системе, построенной на принципах архитектуры когнитивного мо-

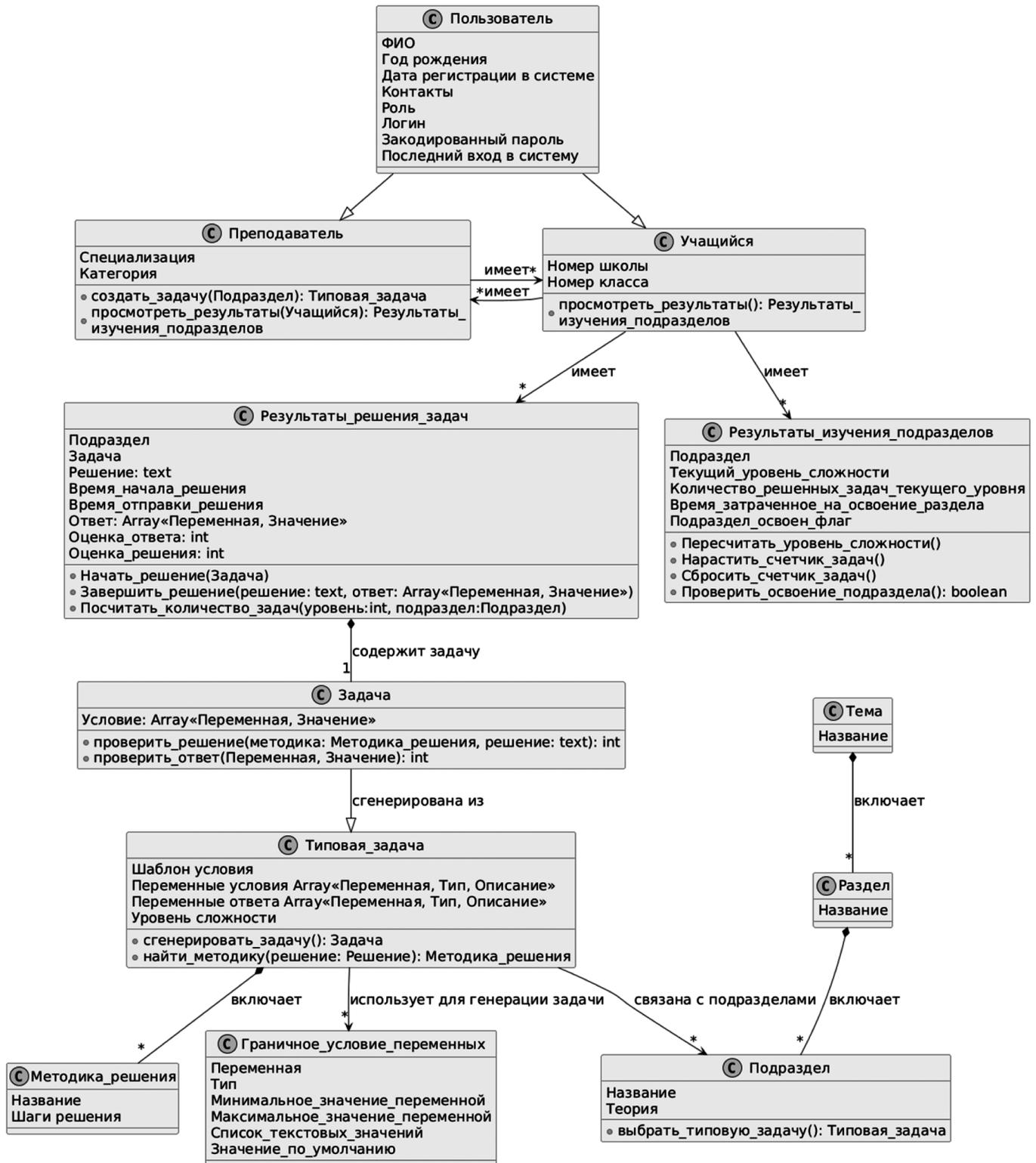


Рис. 1. Диаграмма классов системы подготовки к олимпиадам

делирования, выявлять его сильные и слабые стороны. Например, данные о скорости выполнения задач, числе ошибок и динамике успеваемости позволяют оценить уровень знаний и предсказать успешность выполнения будущих заданий. Модели кластеризации и класси-

фикации могут использоваться для разделения учащихся на группы по сходным уровням и стилям обучения, что позволяет создавать более персонализированные задания и учебные планы.

Заключение

На основании предложенной архитектуры и выявленных требований была разработана система обучения решению типовых задач. Основой системы является распределенный монолит на основе Onion Architecture, что обеспечивает строгую модульность и подготовленность к возможному масштабированию на микросервисы. В рамках данной работы была создана подробная диаграмма классов, которая описывает все основные сущности системы: от пользователей и учебных материалов до механизмов адаптации уровня сложности задач и методов проверки решений.

Система обеспечивает гибкость и масштабируемость, что позволяет адаптировать её под потребности

различных типов пользователей — учащихся и преподавателей. Также описаны возможные подходы к проверке решений учащихся, включающие использование искусственного интеллекта, когнитивного моделирования и дерева решений. Это создаёт основу для дальнейшего научного исследования и развития системы.

Архитектура и структура данных были специально разработаны таким образом, чтобы поддерживать чёткое разделение функциональных слоёв, что упрощает поддержку и развитие системы. Система предоставляет инструменты для отслеживания успеваемости, адаптации уровня сложности и управления учебными материалами, что делает её мощным инструментом для образовательного процесса.

ЛИТЕРАТУРА

- Xiong, Zhang, Li, Haoxuan, Liu, Zhuang, Chen, Zhuofan, Zhou, Hao, Rong, Wenge, & Ouyang, Yuanxin. (2024). A Review of Data Mining in Personalized Education: Current Trends and Future Prospects. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.17236>
- Slavin R.E., & Karweit N.L. (1985). Effects of Whole Class, Ability Grouped, and Individualized Instruction on Mathematics Achievement. *American Educational Research Journal*, 22(3), 351–367. <https://doi.org/10.3102/00028312022003351>
- Kumar A., Ahuja N.J. (2020). An Adaptive Framework of Learner Model Using Learner Characteristics for Intelligent Tutoring Systems. In: Choudhury, S., Mishra, R., Mishra, R., Kumar, A. (eds) *Intelligent Communication, Control and Devices. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 989. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8618-3_45
- Truong H.M. (2016). Integrating learning styles and adaptive e-learning system: Current developments, problems, and opportunities. *Computers in Human Behavior*, 55(Part B), 1185–1193. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2015.02.014>
- Essalmi F., Ayed L.J.B., Jemni M., Graf S., & Kinshuk. (2015). Generalized metrics for the analysis of E-learning personalization strategies. *Computers in Human Behavior*, 48, 310–322. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2014.12.050>
- Ахметшина Э.И., Пономарёв Н.А., Абдюшева А.Д. Моделирование образовательных траекторий с использованием искусственного интеллекта // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки*. — 2024. — №01. — С. 20–23 DOI 10.37882/2223–2966.2024.01.03
- Лозинская А.М. Вопросы развития системного мышления в процессе электронного обучения: дифференциально-интеграционный подход. *Образовательные технологии и общество*, vol. 21, № 3, 2018, С. 409–421.
- Лебедева Л.Н. Формирование нового стиля мышления в процессе информатизации общества. *Вестник Армавирского государственного педагогического университета*, № 2, 2022, С. 168–178.
- Сергеев С.Ф. Инструменты обучающей среды: стили обучения. *Школьные технологии*, № 5, 2010, С. 19–27.
- Чистяков А.В. Стили обучения и повышение эффективности учебной деятельности. *Вестник Московского государственного лингвистического университета. Образование и педагогические науки*, № 3 (840), 2021, С. 77–188.
- Shen J.T., Yamashita M., Prihar E., Heffernan N., Wu X., Graff B., & Lee D. (2021). MathBERT: A Pre-trained Language Model for General NLP Tasks in Mathematics Education. arXiv preprint arXiv:2106.07340. URL: <https://arxiv.labs.arxiv.org/html/2106.07340> (дата обращения 26.10.2024)
- Shen J.T., Yamashita M., Prihar E., Heffernan N., Wu X., McGrew S., & Lee D. (2021). Classifying Math Knowledge Components via Task-Adaptive Pre-Trained BERT. In *Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence in Education* (pp. 417–429). Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-030-78292-4_33
- Ritter Frank & Tehranchi Farnaz & Oury, Jacob. (2018). ACT-R: A cognitive architecture for modeling cognition. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*. 10. e1488. [10.1002/wcs.1488](https://doi.org/10.1002/wcs.1488).
- Whitehill J. (2013). Understanding ACT-R — an Outsider’s Perspective. Retrieved from <https://arxiv.labs.arxiv.org/html/1306.0125>.
- Anthony Frazier, Joethi Silva, Rachel Meilak, Indranil Sahoo, Michael Broda, David Chan, *Decision Tree-Based Predictive Models for Academic Achievement Using College Students’ Support Networks*, *J. data sci.* 21(2021), no. 3, 557–577, DOI 10.6339/21-JDS1033
- de Souza Zanirato Maia, J.; Bueno, A.P.A.; Sato, J.R. Applications of Artificial Intelligence Models in Educational Analytics and Decision Making: A Systematic Review. *World* 2023, 4, 288–313. <https://doi.org/10.3390/world4020019>
- Su Ruoyu & Li Xiaozhou & Taibi Davide. (2023). Back to the Future: From Microservice to Monolith. [10.48550/arXiv.2308.15281](https://arxiv.org/abs/2308.15281).
- Шостак И.В., Собчак А.П., Фирсова А.В., Кушнарченко А.С. Агрегация данных для формирования производственных решений на промышленных предприятиях с использованием онтологических систем *Traektorii Nauki = Path of Science*, vol. 2, no. 3, 2016.
- An In-Depth Understanding of Aggregation in Domain-Driven Design. Retrieved from https://www.alibabacloud.com/blog/an-in-depth-understanding-of-aggregation-in-domain-driven-design_598034.

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОЙ СИСТЕМЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ELK-СТЕКА

IMPLEMENTATION OF A DATA ANALYSIS SOFTWARE SYSTEM BASED ON THE ELK STACK

**A. Pantykhin
V. Gladun
I. Malinin
S. Molodyakov**

Summary. This paper presents the development of a data analysis software system based on the ELK stack (Elasticsearch, Logstash, Kibana) designed for processing and analyzing sales data from various marketplaces. The system enables data collection, preprocessing, analysis, and visualization, allowing for the identification of market trends and demand forecasting. The focus is on the system's flexibility, scalability, and performance, making it an effective tool for informed decision-making in the digital economy.

Keywords: data analysis, ELK stack, Kafka, Logstash, Elasticsearch, Kibana, Python, BI system.

Пантюхин Андрей Максимович
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
panandafog@gmail.com

Гладун Владимир Владимирович
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
vladimir.gldn@gmail.com

Малинин Илья Игоревич
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
malinin.ilja@gmail.com

Молодяков Сергей Александрович
Доктор технических наук, профессор,
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
molodyakov_sa@spbstu.ru

Аннотация. В данной работе представлена разработка программной системы анализа данных на основе ELK-стека (Elasticsearch, Logstash, Kibana), предназначенной для обработки и анализа данных о продажах товаров с различных маркетплейсов. Система обеспечивает сбор, предобработку, анализ и визуализацию данных, что позволяет выявлять рыночные тенденции и прогнозировать спрос. Основное внимание уделено гибкости, масштабируемости и производительности системы, что делает ее эффективным инструментом для принятия обоснованных решений в условиях цифровой экономики.

Ключевые слова: анализ данных, ELK стек, Kafka, Logstash, Elasticsearch, Kibana, Python, BI система.

Введение

С ростом объемов генерируемых данных возрастает необходимость в эффективном управлении и анализе информации, что делает системы бизнес-аналитики (BI — Business Intelligence) ключевыми инструментами для преобразования данных в структурированную форму и принятия обоснованных решений. BI-платформы включают инструменты для сбора, интеграции, анализа и визуализации данных, обеспечивая возможность создания отчетов и аналитических панелей для своевременного принятия решений [1].

В условиях современной цифровой экономики разработка и внедрение BI-систем требует высокой гибкости, масштабируемости и производительности. Такие системы оптимизируют бизнес-процессы, повышают качество управленческих решений и усиливают конкурентоспособность организаций, делая их важным элементом для успешного функционирования и развития бизнеса.

Особую актуальность приобретает создание BI-платформ для анализа данных с маркетплейсов и других платформ для продажи товаров [2]. Популярность маркетплейсов в последние годы активно растет, как показано на рис. 1.

Эти платформы позволяют эффективно собирать, обрабатывать и анализировать данные, выявлять рыночные тенденции и прогнозировать спрос, что способствует более глубокому пониманию рынка и улучшению стратегической и операционной деятельности компаний [3].

Анализ существующих решений

Системы бизнес-аналитики (BI) играют важную роль в стратегическом управлении и анализе данных в различных отраслях. Рассмотрим основные BI-решения и их преимущества и недостатки.

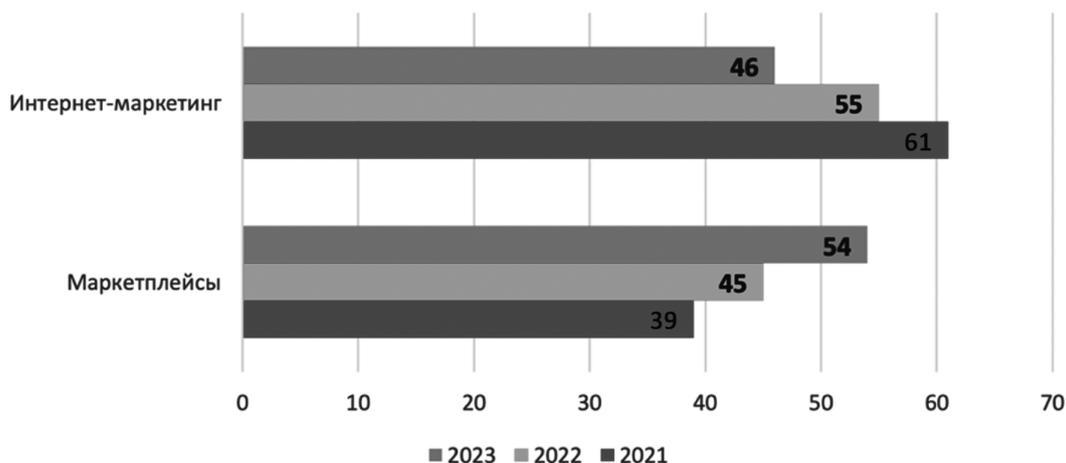


Рис. 1. Структура российского рынка электронной коммерции по каналам продаж, %

Tableau [4] отличается мощной визуализацией и интуитивно понятным интерфейсом, но его высокая стоимость и ограниченные возможности обработки данных делают его менее привлекательным для крупных проектов. Power BI [5], интегрированный с продуктами Microsoft, предлагает доступные решения и удобную визуализацию, однако может страдать от ограниченных возможностей кастомизации и зависимости от облачных сервисов.

Qlik Sense [6] предоставляет высокую производительность и ассоциативную модель данных, что облегчает исследование связей, но требует больше времени на обучение. SAP BusinessObjects [7] обладает мощными аналитическими функциями и гибкостью, но его сложность и высокая стоимость делают его подходящим лишь для крупных предприятий, использующих SAP. Looker [8] и Domo [9] предлагают мощные инструменты для анализа и работы с данными в облачных средах, но их стоимость и сложность настройки могут стать препятствием для небольших компаний.

Хотя все эти системы предлагают широкий спектр возможностей для анализа данных, они не включают специализированные инструменты для работы с данными о продажах товаров и системами сбора данных с объявлений. Это создает нишу для разработки решений, ориентированных на анализ данных о рынке товаров, которые могут эффективно конкурировать в этой области.

Архитектура системы

Для обеспечения надежного и эффективного хранения данных и работы с ними архитектура системы включает несколько ключевых модулей. Основной модуль хранения данных отвечает за масштабируемое и надежное постоянное хранение информации, обеспечивая быстрый доступ и поиск.

Второй важный компонент — модуль анализа данных, выполняющий задачи по обработке и анализу информации. Он считывает данные из хранилища, проводит необходимые вычисления и возвращает обработанные данные. Задачи этого модуля включают удаление дубликатов, фильтрацию невалидных данных и анализ содержимого объявлений.

Для представления результатов анализа необходим модуль визуализации данных, который создает интерактивные дашборды и визуализации, помогая пользователям легко интерпретировать данные. Также архитектура включает message-брокер для буферизации данных и модуль предобработки для начальной очистки и трансформации данных перед их загрузкой в хранилище. Модуль-коннектор предоставляет API для интеграции с внешними источниками данных и настройки схемы данных. Этот многоуровневый подход обеспечивает гибкость, масштабируемость и эффективность системы анализа данных.

Компоненты системы представлены на рис. 2.

Выбор технических средств

Для реализации проекта был выбран ELK стек (Elasticsearch [10], Logstash [11], Kibana [12]) благодаря его гибкости, масштабируемости и мощным возможностям визуализации данных. Эта комбинация технологий является open-source, что делает ее экономически эффективным решением. ELK стек обеспечивает надежное хранение данных, их анализ и наглядное представление результатов, что особенно важно для проектов с большими объемами информации.

Для первичной обработки данных используется Logstash, который позволяет собирать, фильтровать и трансформировать данные перед их отправкой в хранилище. В качестве message-брокера выбран Apache Kafka [13], который обеспечивает надежную и быструю



Рис. 2. Компоненты системы

передачу данных в системе. Для анализа данных применяется Apache Spark, интегрированный с Python [14], что обеспечивает высокую производительность и удобство разработки аналитических приложений.

Контейнеризация всех компонентов системы реализована с использованием Docker [15], что позволяет легко развертывать, масштабировать и управлять системой. Этот подход обеспечивает консистентность среды на всех этапах разработки и эксплуатации, а также упрощает интеграцию новых компонентов.

Реализация коннектора

Для упрощения развертывания и управления проектом используется Docker Compose [16], позволяющий определить и настроить все необходимые сервисы в одном конфигурационном файле. Сервисы включают основные компоненты системы, такие как анализатор, базы данных, инструменты визуализации и message-брокеры. Это обеспечивает гибкость в управлении зависимостями между сервисами, настройке портов и сетей, а также упрощает интеграцию и масштабирование системы.

Сборка и распространение контейнеров осуществляется через Docker Hub, что позволяет создавать универсальные образы под разные архитектуры и легко распространять их среди пользователей. Для этого используются скрипты, автоматизирующие процесс сборки и загрузки образов на Docker Hub. Масштабирование системы обеспечивается через настройку компонентов, таких как Elasticsearch и Kafka, для работы в распределенной среде с поддержкой шардинга и репликации данных, что позволяет эффективно управлять большими объемами данных в реальном времени.

На схеме (рис. 3) представлена архитектура системы коннектора.

Предобработка данных

Модуль предобработки данных представляет собой пакет Python, который интегрируется с Logstash через REST API для обработки поступающих данных. Основная задача этого модуля заключается в автоматическом заполнении недостающих данных в описаниях товаров на русском языке с помощью методов машинного обучения. Модуль использует предобученные модели на основе архитектуры BERT и другие инструменты обработки естественного языка, такие как spaCy и mBART, для обработки и анализа текстовых данных.

Основные этапы предобработки данных включают лингвистический разбор текста с использованием spaCy, перевод названий признаков с английского на русский с помощью mBART и извлечение признаков и их значений на основе синтаксического анализа текста. Модуль также применяет модель ruBERT для поиска синонимов в текстах, что позволяет более точно определять и заполнять значения признаков на основе контекста.

Этот модуль обеспечивает высокую точность и эффективность при работе с текстовыми данными, позволяя автоматически заполнять недостающие поля в описаниях товаров и улучшать качество данных перед их дальнейшей обработкой и анализом.

Модуль анализа данных

Модуль анализа данных играет ключевую роль в обработке и интерпретации информации, собранной си-

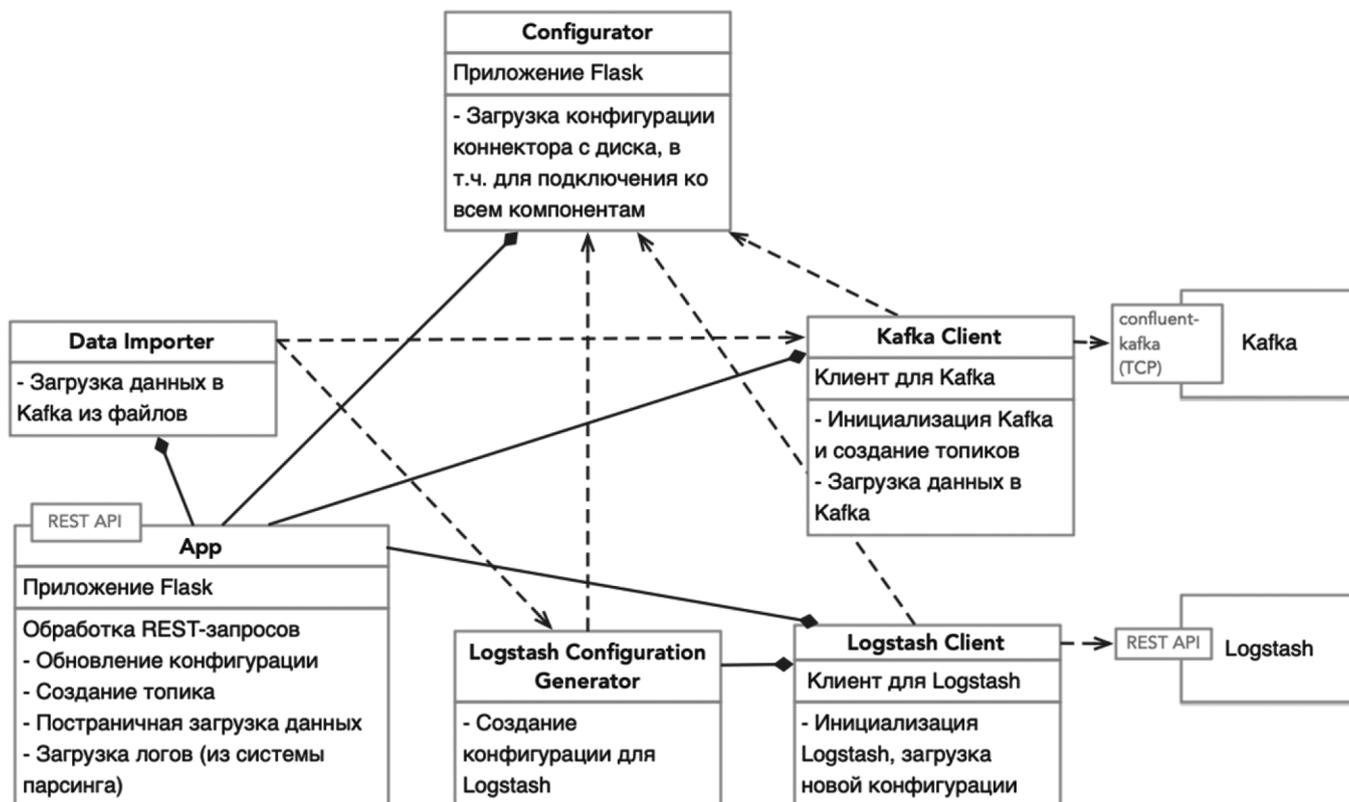


Рис. 3. Компоненты системы коннектора

стемой. После завершения процесса сбора данных или по необходимости, этот модуль запускает процедуры анализа, что позволяет извлекать из данных полезные инсайты и формировать аналитические отчеты. Для реализации аналитических процессов используется платформа Apache Spark, которая предоставляет мощные инструменты для обработки больших объемов данных в распределенной среде.

Одним из главных преимуществ использования Apache Spark является возможность выполнения SQL-запросов для анализа данных. В проекте принято решение использовать SQL, так как это упрощает создание и изменение запросов без необходимости вмешательства в код, а также обеспечивает понятность и доступность работы системы для других разработчиков. SQL-запросы позволяют гибко взаимодействовать с данными, загруженными из Elasticsearch, и выполнять сложные операции по их обработке и анализу. В результате каждый запрос на анализ представляет собой JSON-файл, содержащий параметры, такие как входной и выходной индексы Elasticsearch и сам SQL-запрос.

Процесс анализа данных включает несколько ключевых шагов: от инициации запроса через REST API до выполнения SQL-запросов и сохранения результатов в выходной индекс Elasticsearch. Важнейшие компоненты системы, такие как Analyser и SparkSessionConfigurator,

обеспечивают конфигурацию и создание сессий Spark, которые затем используются для выполнения запросов и обработки данных. В дополнение к SQL-запросам, в системе реализованы базовые функции анализа для упрощения разработки и тестирования, предоставляющие дополнительные возможности для работы с данными и создания отчетов. Например, такие методы как groupBy, min, avg и max позволяют агрегировать и анализировать данные, создавая краткие отчеты по ключевым показателям целевых групп объявлений.

Схема компонентов этого модуля представлена на рис. 4.

Оценка результатов работы

Для оценки результатов работы было проведено тестирование и сбор необходимых метрик. Процесс тестирования включает в себя создание модульных и интеграционных тестов, а также тестирование всей системы целиком (End-to-end тесты). Несмотря на наличие автоматических тестов, в ходе работы над проектом все еще применялось и ручное тестирование ввиду удобства применения для отладки.

При оценке качества предобработки данных основное внимание уделяется трем ключевым характеристикам: проценту правильного распознавания отсут-

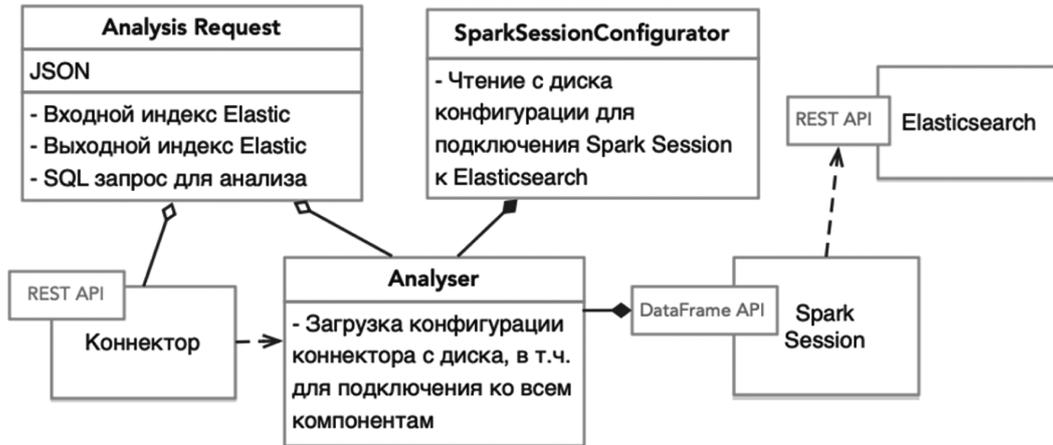


Рис. 4. Схема компонентов модуля анализа данных

ствующих признаков, проценту ложных срабатываний, и скорости работы алгоритма. Правильное распознавание недостающих признаков важно для точности анализа, но еще более критичным является минимизация ложных срабатываний, так как они могут значительно исказить данные и повлиять на результаты анализа. Скорость работы алгоритма также играет важную роль, так как она напрямую влияет на общую производительность системы.

Тестирование модуля предобработки показало, что система успешно распознает около 70 % числовых признаков, с минимальными ложными срабатываниями. Однако при работе с текстовыми признаками, такими как цвет, возникает около 20 % ложных срабатываний, что привело к решению временно отключить их распознавание до улучшения системы. Эти результаты подчеркивают важность настройки алгоритма для достижения баланса между точностью распознавания и минимизацией ошибок.

Система была протестирована на реальных данных, собранных с интернет-ресурса Авито Авто [17], где было собрано 886039 объявлений о продаже автомобилей, что заняло 48 часов и привело к объему данных в 2,4 ГБ в формате JSON. Во время испытаний было выявлено, что самым медленным компонентом системы является модуль предобработки данных, который в среднем затрачивает около трех секунд на обработку одного объявления. Хотя это время обработки не критично на текущем этапе, поскольку большинство объявлений имеют корректно заполненные поля, данная задержка может стать проблемой при увеличении объемов данных.

Скорость работы модуля анализа данных также была оценена в ходе испытаний. Несмотря на то, что она не яв-

ляется столь критичной, как скорость предобработки, она все же существенно влияет на пользовательский опыт. На анализ собранного объема данных с использованием базового набора запросов потребовалось около 90 секунд, что является приемлемым показателем. Для демонстрации возможностей анализа с использованием Kibana были созданы визуализации, подтверждающие эффективность работы системы в реальных условиях.

Заключение

В ходе работ была успешно спроектирован и разработан модульный сервис, который не только обладает гибкостью в плане модификаций, но и демонстрирует высокую эффективность благодаря использованию Python, MongoDB и MongoEngine. Эти технологии были выбраны с учетом их сильных сторон, таких как гибкость схем данных и простота масштабирования, что обеспечило надежную основу для проекта.

Проведено тестирование сервиса и был определен наиболее эффективный алгоритм хеширования и размера сегмента данных. Были выбраны алгоритм хеширования MD5 и размер сегмента в 32 байта. В ходе тестирования не было выявлено ошибок после дедупликации и процесса обратного восстановления исходного файла.

Эти результаты подтверждают, что предложенный подход к дедупликации обеспечивает не только общую производительность системы хранения данных, но и высокий уровень надежности и целостности данных. На основе полученных данных можно сделать вывод, что разработанный сервис подходит для предприятий, стремящихся минимизировать расходы на хранение больших объемов информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Abu-ALSondos I.A. The impact of business intelligence system (BIS) on quality of strategic decision-making // International Journal of Data and Network Science, Jul 2023.
2. Окунева Е.С. Влияние маркетплейсов на развитие цифровой торговли в Российской Федерации. // Мир студенческой науки, 2023.
3. Fruhwirth M., Rachinger M., Prlja E. Discovering business models of data marketplaces. // Proceedings of the 53rd Hawaii International Conference on System Sciences, 2020.
4. Tableau Public: Resources to Learn Tableau [Электронный ресурс] // Tableau Software: [сайт]. URL: <https://public.tableau.com/en-us/s/resources> (дата обращения: 09.06.2024).
5. Power B.I. Documentation [Электронный ресурс] // Power BI: [сайт]. URL: <https://docs.microsoft.com/en-us/power-bi/> (дата обращения: 09.06.2024).
6. Qlik Data Integration, Data Quality, and Analytics Solutions [Электронный ресурс] // Qlik Sense: [сайт]. URL: <https://www.qlik.com/us> (дата обращения: 09.06.2024).
7. SAP BusinessObjects Business Intelligence suite [Электронный ресурс] // SAP: [сайт]. URL: <https://www.sap.com/products/technology-platform/bi-platform.html> (дата обращения: 09.06.2024).
8. Looker business intelligence platform embedded analytics [Электронный ресурс] // Google Cloud: [сайт]. URL: <https://cloud.google.com/looker> (дата обращения: 09.06.2024).
9. Discover the Domo Data Experience Platform [Электронный ресурс] // Domo: [сайт]. URL: <https://www.domo.com> (дата обращения: 09.06.2024).
10. Elasticsearch: The Official Distributed Search & Analytics Engine [Электронный ресурс] // Elastic: [сайт]. URL: <https://www.elastic.co> (дата обращения: 09.06.2024).
11. Logstash: Collect, Parse, Transform Logs [Электронный ресурс] // Elastic: [сайт]. URL: <https://www.elastic.co/logstash> (дата обращения: 09.06.2024).
12. Kibana: Explore, Visualize, Discover Data [Электронный ресурс] // Kibana: [сайт]. URL: <https://www.elastic.co/kibana> (дата обращения: 09.06.2024).
13. Apache Kafka Use Cases [Электронный ресурс] // Apache Kafka: [сайт]. URL: <https://kafka.apache.org/documentation/> (дата обращения: 09.06.2024).
14. Documentation [Электронный ресурс] // Python: [сайт]. URL: <https://www.python.org/doc/> (дата обращения: 09.06.2024).
15. Docker Documentation [Электронный ресурс] // Docker: Accelerated Container Application Development: [сайт]. URL: <https://docs.docker.com> (дата обращения: 09.06.2024).
16. Docker Compose overview [Электронный ресурс] // Docker Docs: [сайт]. URL: <https://docs.docker.com/compose/> (дата обращения: 09.06.2024).
17. Купить автомобиль в Санкт-Петербурге [Электронный ресурс] // Авито: [сайт]. URL: <https://www.avito.ru/sankt-peterburg/avtomobili> (дата обращения: 09.06.2024).

© Пантюхин Андрей Максимович (panandafog@gmail.com); Гладун Владимир Вадимович (vladimir.gldn@gmail.com);
Малинин Илья Игоревич (malinin.ilja@gmail.com); Молодяков Сергей Александрович (molodyakov_sa@spbstu.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

РАЗРАБОТКА ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПЕРЕНОСА МУЗЫКАЛЬНОЙ БИБЛИОТЕКИ МЕЖДУ СЕРВИСАМИ

DEVELOPMENT OF AN APPLICATION FOR AUTOMATING THE TRANSFER OF MUSIC LIBRARIES BETWEEN SERVICES

A. Pantykhin
V. Gladun
I. Malinin
S. Molodyakov

Summary. The article describes the development of an application for automating the transfer of music libraries between different streaming services. The focus is on selecting a system architecture, which is a client-server application using the Swift language and the Spring framework. A comparison algorithm for audio tracks was developed and tested, considering the specific formatting of titles and artists in various services. Performance and functionality tests were conducted.

Keywords: data deduplication, hash function, data storage system, storage optimization, MongoDB, Python, MongoEngine.

Пантюхин Андрей Максимович

Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
panandafog@gmail.com

Гладун Владимир Вадимович

Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
vladimir.gldn@gmail.com

Малинин Илья Игоревич

Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
malinin.ilja@gmail.com

Молодяков Сергей Александрович

Доктор технических наук, профессор,
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
molodyakov_sa@spbstu.ru

Аннотация. В статье описывается разработка приложения для автоматизации переноса музыкальных библиотек между различными стриминговыми сервисами. Основное внимание уделено выбору архитектуры системы, которая представляет собой клиент-серверное приложение с использованием языка Swift и фреймворка Spring. Разработан и протестирован алгоритм сравнения аудиозаписей, который учитывает специфику оформления названий и исполнителей в разных сервисах. Проведены тесты производительности и функциональности.

Ключевые слова: автоматизация переноса музыки, стриминговый сервис, алгоритм сравнения, клиент-серверное приложение, Swift, Spring, JWT.

Введение

В последние годы наблюдается значительный рост популярности стриминговых сервисов для прослушивания музыки, которые вытесняют локальное хранение музыки на устройствах. Об этом свидетельствует статистика доходности сфер распространения музыки и рост количества пользователей стриминговых платформ, представленная на рис. 1 [1].

Однако переход на новый сервис требует переноса музыкальной библиотеки, что создает для пользователей неудобства, особенно если библиотека большая. Так как основной платформой для использования музыкальных стриминговых сервисов являются мобильные устройства [2], было первоначально разрабатывать сервис именно для них. Было принято решение начать с разработки приложения для iOS ввиду более высокой платежеспособности пользователей, чем у Android [2].

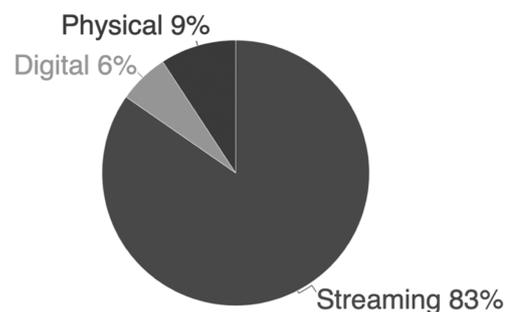


Рис. 1. Доходность сфер распространения музыки

Анализ существующих решений

Во время разработки проекта значительно увеличилась конкуренция среди приложений, аналогичных нашему, особенно на платформе iOS. Ранние конкуренты, такие как «SpotiApp» [3], имели существенные недостатки, например, использовали распознавание названий

песен на скриншотах вместо специализированного API, что делало перенос музыкальной библиотеки медленным и неудобным для пользователей. Во время разработки собственного приложения появились более продвинутое приложения-конкуренты, такие как «Стащи свою музыку» и «FreeYourMusic» [2], которые поддерживают большее количество сервисов, включая те, которые не имеют открытого API, и позволяют автоматически переносить библиотеки без использования скриншотов.

Для повышения конкурентоспособности разрабатываемого приложения необходимо расширить набор поддерживаемых сервисов, включая те, которые не имеют открытого API, но популярны среди пользователей. Это можно сделать, добавив возможность экспорта и импорта данных через файлы, а также создав собственный сервер для хранения музыкальных библиотек пользователей. Наличие сервера позволит реализовать дополнительные функции, такие как резервное копирование данных и синхронизация истории переносов между разными устройствами пользователя, что значительно повысит удобство использования приложения.

Таким образом, расширение поддерживаемых сервисов и создание собственного сервера для хранения данных пользователей могут стать ключевыми факторами для повышения конкурентоспособности и удобства использования нашего приложения, особенно в условиях растущей конкуренции на рынке.

Архитектура системы

Было решено создать клиент-серверное приложение, где клиентское приложение будет осуществлять перенос музыки между сервисами через сетевое соединение, а серверная часть — хранить музыкальную библиотеку пользователя и историю её переносов. Взаимодействие между клиентом и сервером будет обеспечиваться через веб-сервис.

Для реализации веб-сервиса рассматривались несколько архитектурных подходов, таких как XML-RPC, JSON-RPC, SOAP и REST [4]. В итоге был выбран REST, так как он не привязан к конкретному протоколу, предлагает гибкость в обмене сообщениями и поддерживает форматы JSON и XML.

Применение архитектуры REST в проекте также обусловлено её популярностью и универсальностью, что делает её оптимальным выбором для создания мобильных клиент-серверных приложений, обеспечивая удобство и эффективность взаимодействия между компонентами системы.

Архитектура системы представлена на рис. 2.

Выбор технических средств

Для разработки клиентского приложения под iOS был выбран язык программирования Swift, поскольку он более современный и удобный по сравнению с Objective-C [5]. В качестве основного фреймворка рассматривались UIKit и SwiftUI. UIKit распространен и стабилен, но SwiftUI, будучи кроссплатформенным, позволяет легко адаптировать приложение для iPad и macOS. Для управления зависимостями предпочтение было отдано CocoaPods из-за его популярности и удобства использования [5].

Серверная часть приложения реализована на Java с использованием фреймворка Spring, который обеспечивает архитектурный каркас и упрощает разработку благодаря автоматической конфигурации через Spring Boot [6]. В качестве базы данных выбрана PostgreSQL, известная своей надежностью и расширяемостью. Для реализации безопасности используется Spring Security, который легко интегрируется с Spring и предоставляет удобные инструменты для контроля доступа к API [6].

Для аутентификации запросов было решено использовать метод OAuth с токенами JSON Web Token (JWT) [7], который не требует передачи паролей и позволяет фильтровать запросы из неавторизованных источников. Это решение обеспечит необходимую защиту данных в проекте, не требующем хранения конфиденциальной информации. Для тестовой версии выбран протокол HTTP, но для финальной версии планируется перейти на более безопасный HTTPS с использованием SSL/TLS.

HTTPS обеспечивает шифрование данных и проверку подлинности через SSL-сертификат, что делает его предпочтительным выбором для защиты данных при передаче. Однако стоит учитывать, что HTTPS снижает скорость работы и требует дополнительных затрат на сертификат [8].

Реализация клиентского приложения

Архитектура MVVM была выбрана в качестве базового паттерна для создания клиентского приложения на SwiftUI. Схема архитектуры MVVM представлена на рис. 3 [9].

В этой архитектуре классы View отвечают за интерфейс, ViewModel управляет данными для отображения, а Model содержит бизнес-логику. View реагируют на изменения в данных через аннотации, что обеспечивает гибкость и динамичность интерфейса.

Для упрощения взаимодействия между компонентами приложения были реализованы классы типа Facade, которые обеспечивают связь между ViewModel и API музыкальных сервисов, а также доступ к базе данных. Это

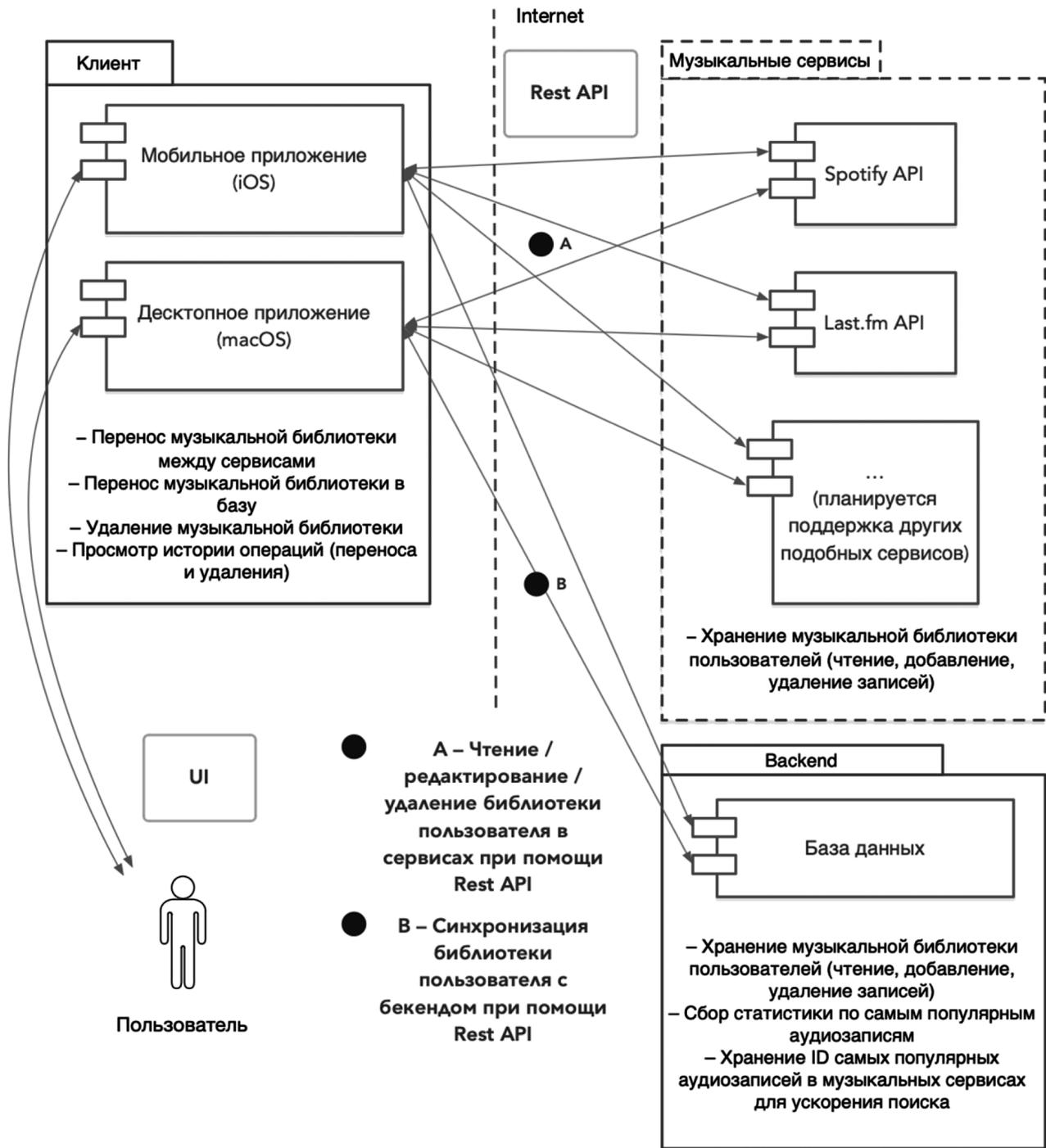


Рис. 2. Архитектура системы

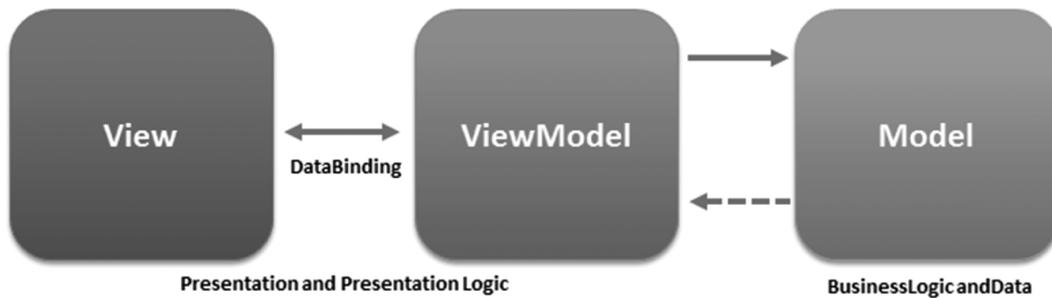


Рис. 3. Архитектура MVVM

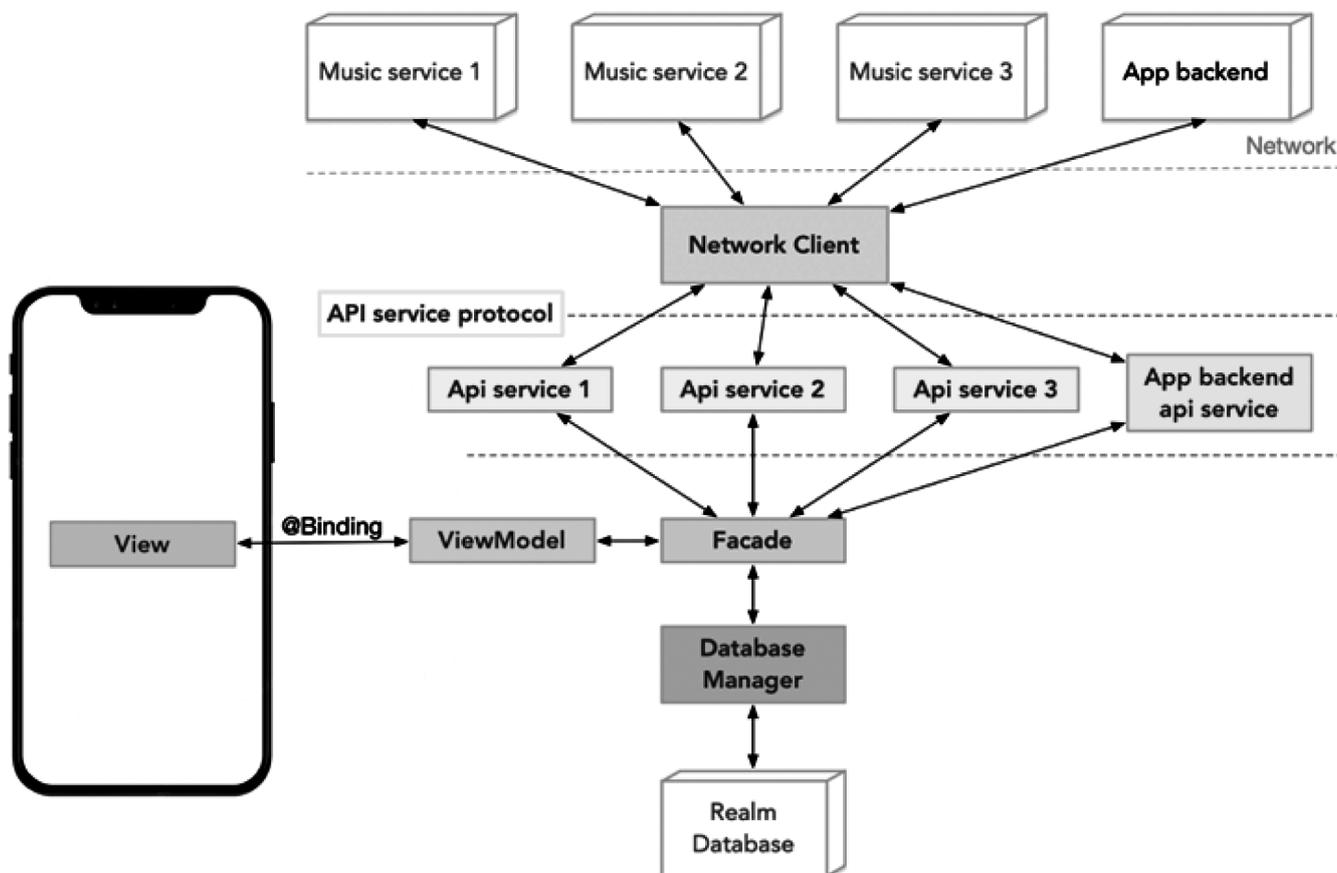


Рис. 4. Архитектура клиентского приложения

решение позволяет легко расширять функциональность приложения, добавляя поддержку новых сервисов и заменяя модули при тестировании, что делает систему гибкой и адаптируемой. Архитектура приложения в упрощенном виде представлена на рис. 4.

Алгоритмы сравнения аудиозаписей

Для сравнения аудиозаписей при переносе музыкальной библиотеки важно использовать подходящий алгоритм. Обычное сравнение строк по названию и исполнителю может быть недостаточным из-за возможных различий в представлении данных о библиотеке в разных сервисах. Поэтому рассмотрены несколько алгоритмов нечеткого сравнения строк, таких как расстояние Левенштейна, алгоритм шинглов и коэффициент Жаккара. Из них наиболее подходящим для данной задачи является алгоритм Левенштейна, который оценивает количество операций, необходимых для преобразования одной строки в другую.

Однако, учитывая разнообразие потребностей пользователей, был разработан собственный алгоритм сравнения, который учитывает специфику оформления названий и исполнителей аудиозаписей в различных сервисах. Этот алгоритм включает в себя несколько шагов: выделение основного названия аудиозаписи,

сравнение названий, проверка наличия исполнителей и сравнение длительности треков.

Процесс сравнения начинается с нормализации строк: приведения текста к нижнему регистру и удаления лишних символов. Затем с помощью регулярных выражений выделяется основное название трека, без дополнительных данных в скобках. После этого выполняется сравнение названий и проверка наличия исполнителей в обоих треках. Если исполнители совпадают, проверяется длительность аудиозаписей с учетом допустимого отклонения в 10 %.

Алгоритм включает следующие шаги: 1) выделение названия без дополнительной информации, 2) сравнение названий, 3) проверка наличия исполнителей в обоих аудиозаписях, 4) повторная проверка, поменяв аудиозаписи местами, 5) сравнение длительности аудиозаписей с учетом допустимого отклонения, 6) возврат положительного результата при успешном завершении всех этапов. Такой подход позволяет учесть все возможные нюансы при переносе музыкальных библиотек между различными стриминговыми сервисами.

Этот алгоритм обеспечивает более точное и гибкое сравнение аудиозаписей, позволяя пользователям с минимальными усилиями переносить свои библиотеки

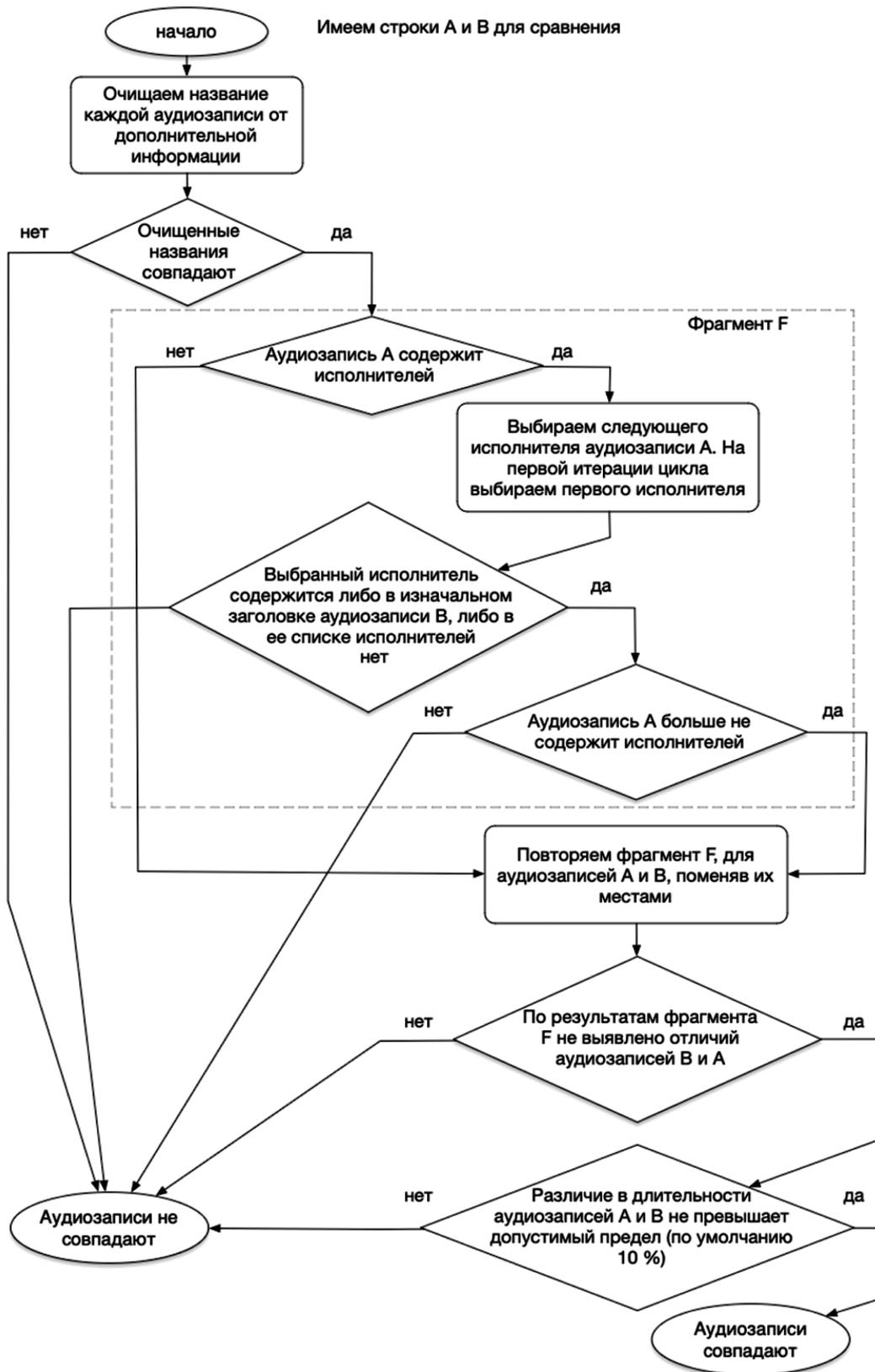


Рис. 5. Алгоритм сравнения аудиозаписей

между сервисами, избегая ошибок и несоответствий. Алгоритм представлен в виде блок-схемы на рис. 5.

Реализация серверной части приложения

Для реализации серверного приложения с использованием Spring были применены стандартные шаблоны проектирования: Controller, Service, Repository и Entity. Эти шаблоны обеспечивают эффективное описание RestAPI, взаимодействие с базой данных, а также позволяют задавать структуру базы данных и связи между таблицами. Классы Controller отвечают за обработку Rest-запросов, Repository обеспечивает доступ к данным без необходимости писать SQL-запросы, а Entity-классы отражают структуру таблиц базы данных и их взаимосвязи.

В качестве базы данных используется PostgreSQL, развернутая в двух экземплярах в Docker-контейнерах — для тестирования и основного сервера. Это разделение позволяет защитить данные от удаления во время тестов и гарантирует независимость тестов друг от друга. Для настройки контейнеров использован Docker Compose, а основная функция базы данных заключается в хранении музыкальных библиотек пользователей и истории их переноса, с центральной таблицей пользователей, связанной с другими таблицами через связи типа Many-to-One.

Процесс регистрации и авторизации пользователей реализован с помощью POST и GET-запросов, создающих и подтверждающих учетные записи через отправку и проверку токенов на электронную почту. После успешной регистрации пользователю выдается JWT-токен, который используется для аутентификации при последующих запросах к серверу. Эта процедура также применяется для смены пароля.

JWT-токены формируются с использованием класса JwtTokenProvider, где каждый токен включает заголовок с информацией об алгоритме шифрования, payload с данными о пользователе и сроком действия токена, а также подпись, созданную с использованием алгоритма HS256. Для проверки токена сервер повторяет процесс его создания и сверяет с полученным в запросе, обеспечивая безопасную авторизацию.

Результаты тестирования

Тестирование серверной части приложения проводилось с использованием Postman для ручного тестирования и Apache JMeter для нагрузочного тестирования. Postman позволил удобно структурировать и протестировать API, а JMeter использовался для оценки производительности сервера при разных нагрузках [10]. Результаты показали, что сервер стабильно справляется с 100 одновременными пользователями, но при 1000 пользо-

вателей время ответа значительно увеличивается, что требует дальнейшей оптимизации при необходимости.

Тестирование клиентской части приложения включало создание модульных тестов с использованием JUnit для проверки ключевой логики, особенно алгоритмов сравнения аудиозаписей. Были созданы протоколы для упрощения тестирования, позволяющие подменять зависимости и улучшать расширяемость кода. Также рассматривалось автоматизированное UI-тестирование, но оно было сочтено нецелесообразным из-за трудоемкости дальнейшей поддержки тестов, поэтому основной акцент был сделан на ручном тестировании.

Алгоритмы сравнения аудиозаписей, задействованные при переносе библиотек, были протестированы тремя методами: простым сравнением названий, использованием коэффициента Левенштейна и собственным алгоритмом. Простое сравнение позволило перенести 70 % записей, коэффициент Левенштейна — 88 %, а собственный алгоритм — 99 %. Каждый метод имеет свои преимущества: простое сравнение минимизирует ошибки, но переносит меньше записей, коэффициент Левенштейна достигает средней точности, а собственный алгоритм максимально переносит записи, но допускает небольшие отклонения.

Выбор алгоритма зависит от предпочтений пользователя: точность или количество перенесенных аудиозаписей. Все три алгоритма могут быть полезны для разных категорий пользователей, обеспечивая гибкость и адаптируемость процесса переноса музыкальных библиотек между сервисами.

Заключение

По итогам проделанной работы была разработана полноценная версия программного продукта. Выявлено, что архитектура системы позволяет легко добавлять новые компоненты и обеспечивает достаточный уровень защиты данных от несанкционированного доступа.

Модульная структура программы делает ее удобной для командной работы, что важно при расширении проекта. В процессе разработки подтвердился высокий спрос на подобное решение, так как появились новые конкуренты, что подчеркивает актуальность идеи.

Для дальнейшего развития проекта целесообразно расширить поддержку большего числа сервисов, особенно тех, которые не имеют открытого API. Это можно реализовать через интеграцию с веб-страницами этих сервисов или через экспорт музыкальных библиотек в различные форматы файлов, поддерживаемые другими платформами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Music Streaming App Revenue and Usage Statistics / Текст: электронный // Business of Apps. — URL: <https://www.businessofapps.com/data/music-streaming-market/> (дата обращения: 16.08.2024).
2. iPhone vs Android market share / Текст: электронный // Macworld. — URL: <https://www.macworld.com/article/673487/iphone-vs-android-market-share.html> (дата обращения: 16.08.2024).
3. AppStore / Текст: электронный // Apple. — URL: <https://www.apple.com/app-store> (дата обращения: 16.08.2024).
4. Huang Z., Fan X., Li Z., Zhao C., Chen G., and Liu Y. Analysis of Anomaly Detection Techniques Applied to Web API Network Scenario // IEEE 11th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference. — 2023. — vol. 11.
5. Rahkema K., Pfahl D., and Ramler R. Analysis of Library Dependency Networks of Package Managers Used in iOS Development. // 2023 IEEE/ACM 10th International Conference on Mobile Software Engineering and Systems (MOBILESoft). — 2023.
6. Mythily M., Kanakala V.R., and Nambiar R. An Extensive Review of Spring Boot Testing Based on Business Requirements of the Software. // 2023 4th International Conference on Smart Electronics and Communication. — 2023.
7. Nugraha A.F., Kabetta H., Buana I.K.S., and Hadiprakoso R.B. Performance and security comparison of json web tokens (jwt) and platform agnostic security tokens (paseto) on restful apis. // 2023 IEEE International Conference on Cryptography, Informatics, and Cybersecurity. — 2023.
8. Zineddine A., Chakir O., Sadqi Y., Maleh Y., Gaba G.S., Gurtov A., and Dev K. A systematic review of cybersecurity assessment methods for HTTPS // Computers and Electrical Engineering. — 2023.
9. Indrawan D., Kusumo D.S., and Puspitasari S.Y. Analysis of the Implementation of MVVM Architecture Pattern on Performance of iOS Mobile-based Applications. // Jurnal Ilmiah Penelitian dan Pembelajaran Informatika. — 2023.
10. Tiwari V., Upadhyay S., Goswami J.K., and Agrawal S. Analytical Evaluation of Web Performance Testing Tools: Apache JMeter and SoapUI. // 2023 IEEE 12th International Conference on Communication Systems and Network Technologies. — 2023.

© Пантюхин Андрей Максимович (panandafog@gmail.com); Гладун Владимир Вадимович (vladimir.gldn@gmail.com);
Малинин Илья Игоревич (malinin.ilja@gmail.com); Молодяков Сергей Александрович (molodyakov_sa@spbstu.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ ПРЕДПРИЯТИЙ АДДИТИВНОЙ ОТРАСЛИ

OPTIMIZATION OF PRODUCTION PROCESSES IN ORGANIZATIONAL SYSTEMS OF ENTERPRISES IN THE ADDITIVE INDUSTRY

**A. Petrunina
N. Tsygankov
A. Moskalev**

Summary. The article presents the results of a study of the transformation of traditional organizational systems of enterprises to distributed network structures using the example of the additive industry. The need for organizational changes is due to the challenges that industrial enterprises currently face. The additive manufacturing industry was chosen as the object of research due to its high importance for import substitution purposes, as well as the cross-cutting nature of the technologies that affect other industries. To test the hypothesis put forward, a company from the additive industry was used to model its business processes and simulate processes lasting 30 days. The optimization criterion in this study was the cost of producing one unit of a 3D printer. Analysis of the simulation results showed that including contract manufacturing in the organizational system for creating technological values will allow the company to optimize costs, and, as a result, the cost of a 3D printer, and reduce the production time of one batch. The implementation of the proposed transformations in the company confirmed their effectiveness.

Keywords: distributed network organizational system, sustainability, business process modeling.

Петрунина Анастасия Эдуардовна
старший преподаватель,

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск
akasimova@sfu-kras.ru

Цыганков Никита Сергеевич

кандидат технических наук, доцент,
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск
cyganikita@yandex.ru

Москалев Александр Константинович

кандидат физико-математических наук, доцент,
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск
ak_moskalev@mail.ru

Аннотация. В статье представлены результаты исследования трансформации традиционных организационных систем предприятий к распределенным сетевым структурам на примере аддитивной отрасли. Необходимость организационных изменений обусловлена теми вызовами, которые в настоящее время стоят перед промышленными предприятиями. Отрасль аддитивных технологий выбрана в качестве объекта исследований в связи с высокой значимостью для целей импортозамещения, а также сквозным характером технологий, оказывающих влияние на другие отрасли промышленности. Для проверки выдвинутой гипотезы на примере компании из аддитивной отрасли проведено моделирование ее бизнес-процессов, а также осуществлена имитация процессов длительностью 30 дней. Критерием оптимизации в данном исследовании рассматривалась себестоимость производства одной единицы 3D-принтера. Анализ результатов имитационного моделирования показал, что включение в организационную систему создания технологических ценностей контрактного производства позволит компании оптимизировать издержки, и, как следствие, себестоимость 3D-принтера, а также сократить срок производства одной партии. Внедрение предлагаемых преобразований в компанию подтвердило их эффективность.

Ключевые слова: распределенная сетевая организационная система, устойчивость, моделирование бизнес-процессов.

Введение

Российская экономика в 2019–2022 гг. столкнулась с рядом вызовов и проблем, такими, что основная повестка развития страны сейчас связана с импортозамещением и формированием технологического суверенитета. Традиционные отрасли промышленности имеют наработанный интеллектуальный и промышленный потенциал для решения возникшей задачи, а отрасль аддитивных производств в настоящее время сталкивается с рядом проблем, среди которых недостаток собственных технологий, зависимость от импортных поставок сырья и комплектующих для производства

3D-принтеров, небольшое количество производителей высокотехнологичной продукции в стране [1]. При этом аддитивная промышленность признается одним из приоритетов на государственном уровне, что подтверждается разработкой и утверждением стратегии развития аддитивных технологий в Российской Федерации на период до 2030 года.

В этой связи представляется актуальной задача поиска условий, обеспечивающих устойчивость организационных систем предприятий аддитивной отрасли.

Для решения задачи была поставлена цель — на примере компании из отрасли аддитивных технологий ис-

следовать возможность применения модели сетевой распределенной организационной системы для повышения ее устойчивости и обеспечения поставки технологической ценности заказчику с заданными параметрами качества.

Методика исследования

При выработке управляющих воздействий, которые поддерживают устойчивое состояние организационной системы, необходимо обеспечить ее наблюдаемость и управляемость [2]. Систему можно считать наблюдаемой, если по ее выходным результатам и управляющему воздействию можно восстановить промежуточные состояния данной системы. Если существует такое управляющее воздействие, которое переводит систему из одного состояния в другое, при этом обеспечивая требуемый выходной результат то её можно считать управляемой.

В нашем случае таким управляющим воздействием являются параметры технического задания, поступившего от заказчика на разработку модели 3D-принтера. Выходным результатом будет технологическая ценность в виде принтера, параметры качества которого соответствуют требованиям качества (изначально сформулированным заказчиком, а также появившимся в процессе разработки). Состояния организационной системы в каждый момент времени будут описывать соответствующие промежуточные технологические ценности заданного качества, поставляемые следующей подсистеме в рамках одной структуры. Общее представление описанной системы показано на рисунке 1.

Анализ эффективности организационной системы проводился моделированием её процессов, декомпозированных на составляющие операции. Также прово-

дилась идентификация основных компетенций сотрудников и их численности, требуемой инфраструктуры, и оценка затрат на обеспечение операций.

Для оценки целесообразности и эффективности применения модели сетевой распределенной организационной системы использован метод имитационного моделирования бизнес-процессов в нотации ePC в программной среде БП-симулятор. Имитация процессов позволяет провести прогнозирование их показателей с течением времени, а также выполнить сравнительный анализ и сделать выводы об их эффективности.

Эмпирическую базу исследования составили внутренние данные корпоративной информационной системы компании ЦНС (название изменено в целях сохранения конфиденциальности), характеризующие ее финансовые потоки, компетентностный состав сотрудников, инфраструктуру и перечень ее контрагентов, а также информацию о результатах выполнения операций за предыдущие периоды.

1. Организационные системы предприятий аддитивной отрасли

Рынок аддитивных технологий в значительной степени управляем потребителем. Связано это с тем, что потребители и заказчики аддитивных технологий нуждаются не в универсальных решениях, а в индивидуальном подходе к формированию требований качества производимой продукции [3]. Таким образом, получаемая продукция должна быть максимально кастомизированной, а конкурентоспособность таких организационных систем обуславливается способностью производителя обеспечивать наилучшее удовлетворение потребностей заказчиков. Кроме того, технологическая ценность,



Рис. 1. Общее представление организационной системы создания технологической ценности

которую создают и доставляют заказчику предприятия аддитивной промышленности, зависит от качества поставляемых технологических ценностей от других поставщиков. Все это составляет особенности, характеризующие цепочки поставки ценности в высокотехнологичных отраслях, в том числе и в аддитивной отрасли.

Эти требования приводят к существенной трансформации цепочек поставки ценности в таких организационных системах, а также в их внутренней структуре. Производство инновационной, высокотехнологичной, и при этом индивидуализированной продукции требует от производителя наличия в его организационной системе высокоспециализированных компетенций, инфраструктуры, достаточного запаса ресурсов, что неизбежно приводит к росту издержек, при этом рост издержек не всегда сопровождается пропорциональным ростом качества. Эти факторы приводят к тому, что организационная система таких предприятий, ограниченная контуром одного предприятия-производителя, теряет свою устойчивость. Под устойчивостью организационной системы в данном контексте будем понимать способность этой системы обеспечивать технологическую ценность для потребителя на заданном уровне качества в течение продолжительного времени. Учитывая давление изменчивых факторов внешней среды, в совокупности с изменяющимися требованиями к качеству со стороны заказчика, обеспечивать устойчивое состояние системы и при этом поддерживать норму прибыли для собственников бизнеса становится все сложнее.

Ввиду трансформации цепочек создания технологической ценности в аддитивной промышленности решение сложившейся проблемы видится в изменении подхода к формированию самой организационной системы, которая эту ценность обеспечивает. Традиционные подходы к формированию организационных структур предполагают все механизмы исполнения и создания технологической ценности концентрировать в рамках одного предприятия. Однако, как было указано выше, в отрасли аддитивных технологий подобные механизмы в цепочке создания ценности являются узкоспециализированными, и нахождение их в контуре одной организации нецелесообразно. В этой связи предлагается формирование распределенной сетевой организационной системы, обеспечивающей всю цепочку создания технологической ценности. Как показывает практика, переход к подобным организационным структурам в высокотехнологичных отраслях промышленности позволяет получить существенные преимущества с точки зрения операционных показателей деятельности компании [4–8].

В данном исследовании под распределенной сетевой организационной системой будем понимать систему, контур которой включает в себя не только предприятие — производителя конечной продукции, но и других

участников, обеспечивающих поставку продукции заданного качества при реализации технологической ценности для конечного потребителя. Отличие данного подхода от традиционных цепочек создания ценности заключается в том, что, несмотря на наличие собственного центра управления в каждой организационной подсистеме, один из участников этой цепочки выступает в качестве координирующего управляющего органа, обеспечивающего согласованное достижение целей всех участников этой системы. Таким образом, цели каждой подсистемы, а также требования к поставляемой ею технологической ценности, являются согласованными, и уровень качества создаваемых ценностей ранних этапов в цепочке вносит свой вклад в достижение конечной технологической ценности для заказчика. В качестве такого координатора на рынках, управляемых потребителем, выступает предприятие, отвечающее за непосредственное взаимодействие с заказчиком, обеспечивающее проектирование, опытно-конструкторские работы, а также дизайн и непосредственную поставку технологической ценности.

2. Моделирование бизнес-процессов организации

Для оценки возможности применения новой модели сетевой распределенной организационной системы рассмотрим пример компании ЦНС из аддитивной отрасли, которая занимается разработкой, проектированием и производством промышленных 3D-принтеров.

Анализ финансовых показателей компании за период 2019–2022 (представлено на рисунке 2) позволил сделать вывод о неустойчивости бизнес-процессов организации. С 2019 года выручка компании падает.

Согласно принятой методике исследования были выявлены основные параметры, необходимые для моделирования рассматриваемой организационной системы создания технологической ценности для потребителя. Исследуемый процесс — производство партии 3D-принтеров с заданными требованиями качества, которая представляет технологическую ценность для заказчика. В рамках декомпозиции бизнес-процессов организации были выделены процессы преобразования состояния организационной системы, начинающиеся составлением спецификации на сырье и материалы для производства, и заканчивающиеся упаковкой готового изделия. В качестве параметров при моделировании определили связи операций и их последовательность, длительность каждой операции для всех бизнес-процессов, а также длительность перемещения результатов одной операции к другой.

В данном исследовании принимается допущение, что одновременно в компании исполняется только один экземпляр процесса, чтобы исключить возможность взаимного влияния создаваемых ценностей друг на друга.

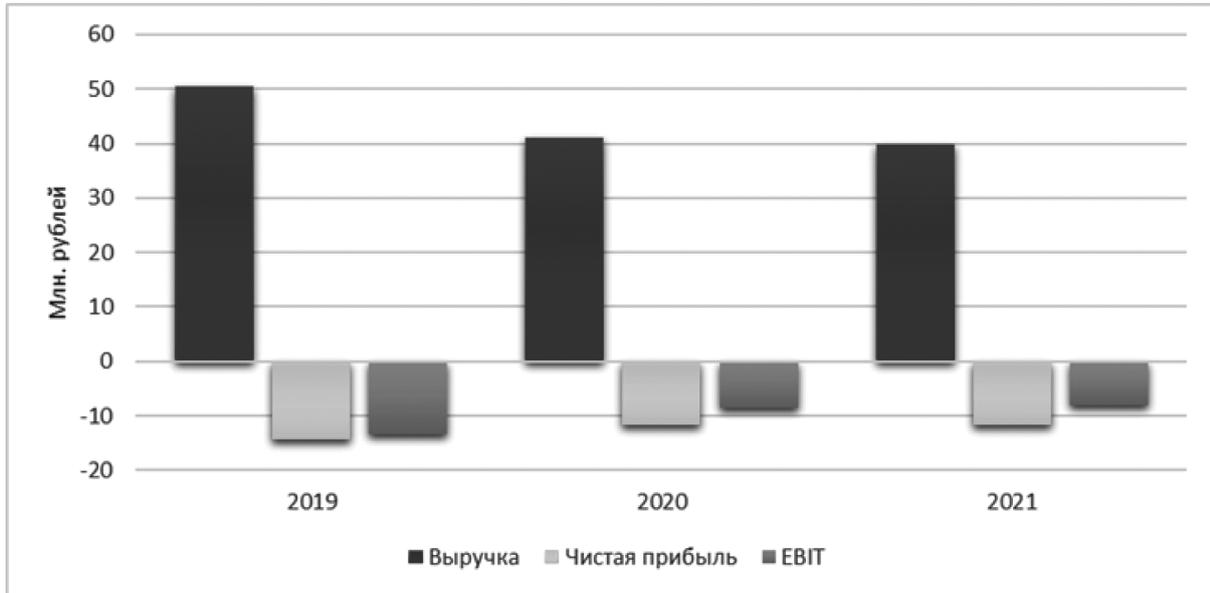


Рис. 2. Динамика финансовых показателей компании

Для каждого идентифицированного процесса необходимо определить механизмы его реализации, обеспечивающие преобразование системы. В данном случае механизмы задаются составом подразделений организационной системы, численностью и квалификацией его работников, их стоимостью в единицу времени. Для моделирования каждой подсистемы был составлен перечень и численность исполнителей, задействованных в процессе, и перечень используемого оборудования. В качестве входных параметров для моделирования учета стоимости рабочего времени была установлена стоимость ресурса в час, для сторонних исполнителей — стоимость за задачу, а для оборудования — норма амортизации.

При моделировании представляется необходимым также учесть тот факт, что возможные переходы системы из одного состояния в другое подчиняются некоторым внутренним правилам, формирующим внутреннюю среду организационной системы. В их числе организационная культура, правила, нормы и процедуры, стиль и методы управления. В данном случае в качестве параметров, характеризующих организационную систему, можно выделить вероятностные характеристики получения сырья и материалов от поставщиков, не соответствующих требуемому уровню качества для этой технологической ценности, а также вероятность возврата результатов операции на предыдущую стадию в случае, если результаты внутренней проверки качества изделия при сборке являются неудовлетворительными. Для оценки данной вероятности используем модель, разработанную в работе [1].

Каждый объект, являющийся входом производственного процесса, обладает некоторым набором

показателей качества, обозначим их множеством X . При поступлении на вход процесса осуществляется проверка соответствия показателей множества X некоторому входному барьеру, обозначим это множество как Y . Те объекты, которые по своим параметрам качества (X) не удовлетворяют барьеру входа (Y), выводятся из процесса, а остальная часть поступает на вход соответствующего процесса.

Так как каждый объект s_j , подлежащий контролю, характеризуется X показателями качества, то для определения вероятности P выполнения требований входного барьера Y по каждому показателю воспользуемся нормальным распределением (1):

$$P(x_{i,s_j} \geq y_i) = 1 - \left(\Phi\left(\frac{y_i - M_i}{\sqrt{M_i}}\right) - \Phi\left(\frac{0 - M_i}{\sqrt{M_i}}\right) \right), \quad (1)$$

где x_i, s_j — значение i -го показателя качества s_j объекта контроля, y_i — значение требования к i -му показателю качества на входном барьере Y , M_i — среднее значение i -го показателя контролируемого объекта. Определяется на основе статистических наблюдений по имеющимся историческим данным осуществления операций в компании за последние 2 года.

Событием, запускающим процесс, является поступление заявки и формирование технического задания на разработку партии принтеров.

С учетом перечисленных параметров создана модель в нотации ePC (рисунок 3) и проведена имитация бизнес-процессов длительностью один производственный цикл (30 дней). Результат представлен на рисунке 4.

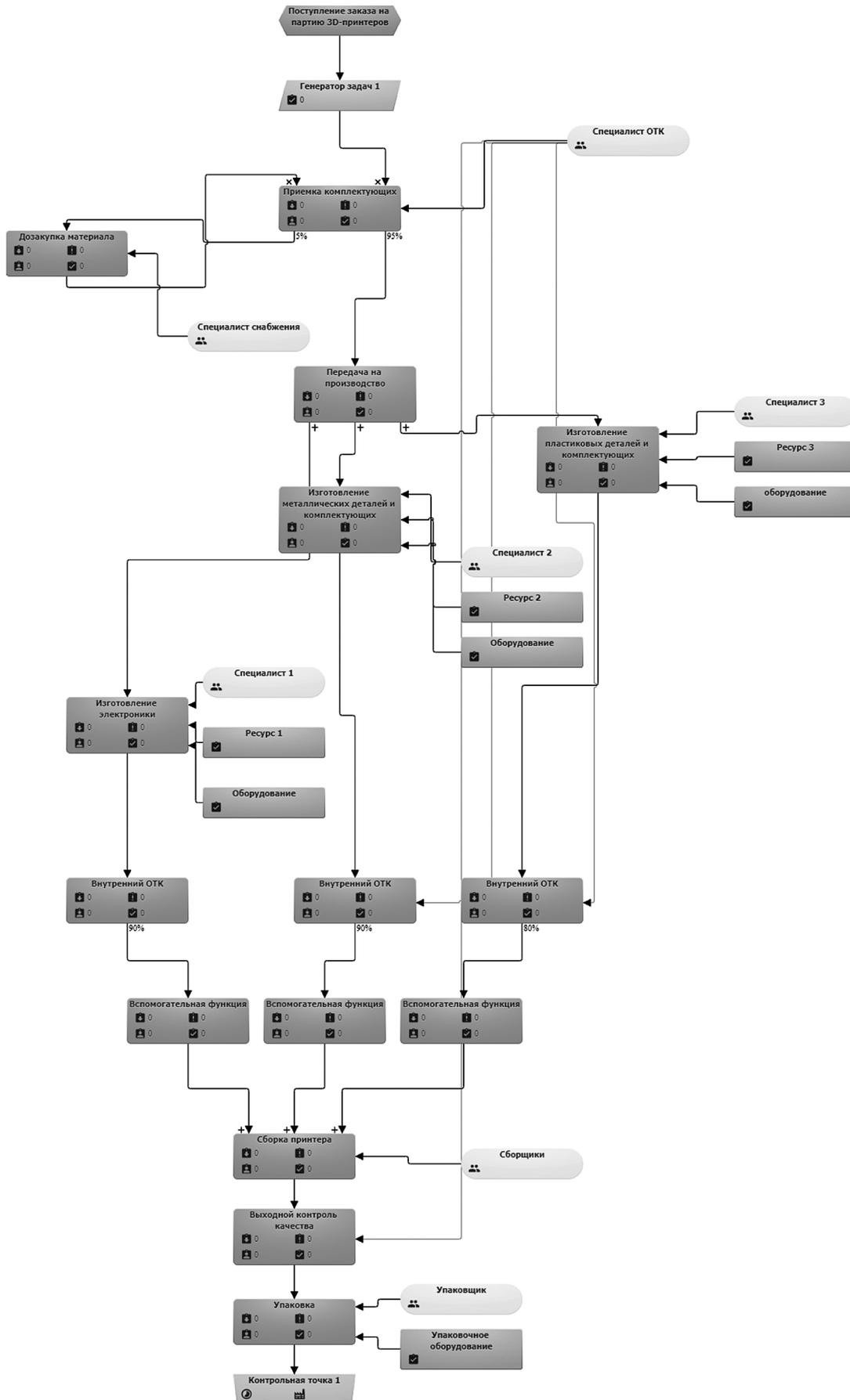


Рис. 3. Представление модели организационной системы цепочки создания технологической ценности «как есть»

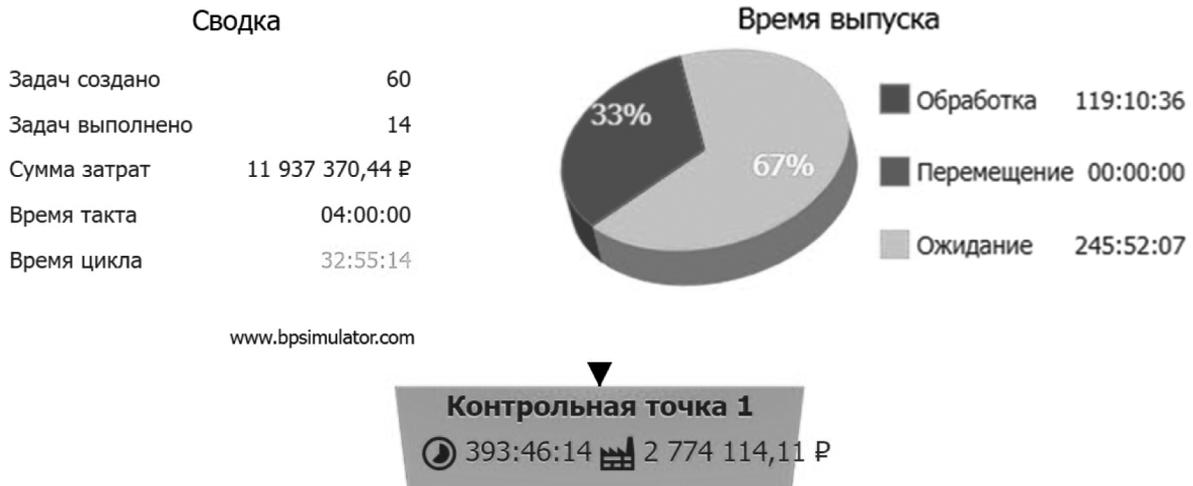


Рис. 4. Результаты имитационных испытаний бизнес-процессов

В результате имитации была получена длительность процесса, которая составила в среднем 119 модельных часов, при этом наблюдается более 200 часов простоя и ожидания функций (см. рисунок 4). Это связано, в первую очередь, с тем, что процессы ввиду наличия вероятности возвратов простаивают в ожидании результата с предыдущей стадии. Согласно модели за 30 дней полный производственный цикл производства завершен для четырнадцати принтеров со стоимостью около 200 тысяч рублей каждый. Модель в соответствии реальным данным адекватно описала время производства принтера и его стоимость.

Согласно модели, самый проблемный этап в организационной системе — это подготовительный, на котором осуществляется снабжение производства материалами, а также контроль их качества, доработка приобретаемых материалов, а также сборка ключевых узлов принтера. Этот этап составляет почти 80 % всего производственного времени.

Такие высокие затраты временного ресурса связаны с ограниченными возможностями организационной системы. Процессы снабжения и входного контроля осуществляются непосредственно перед производством по причине отсутствия возможности поддерживать необходимый уровень складских запасов сырья и материалов необходимого качества. Отсутствие на рынке полуфабрикатов требуемого качества, а также индивидуальные особенности конфигурации принтеров под требования заказчика приводят к необходимости доработки приобретаемых материалов. Высокие временные затраты на сборку связаны, в том числе, с необходимостью освоения новой технологии и конфигурации принтеров исполнителями, задействованными в организации. Отсутствие навыков и новизна приводят к необходимости поэтапного контроля качества создаваемой технологической ценности, что существенно увеличивает время всего процесса. В некоторых случа-

ях, требуется переквалификация специалистов или поиск их на рынке труда.

Перечисленные особенности приводят также к росту операционных издержек. В связи с чем именно этот блок бизнес-процессов было предложено модернизировать с точки зрения механизмов их реализации.

При формировании сетевой распределенной организационной структуры предлагается включить в контур организационной системы механизмы исполнения, ответственные за поставку технологической ценности в виде готовых модулей и узлов для 3D-принтера, передавая тем самым задачи более низкого передела, сопровождающиеся большими затратами времени и финансовых ресурсов, более компетентному участнику, обладающему специализацией по данному направлению. Принято решение передать задачи агрегатной сборки узлов контрактному производству, тем самым перераспределить бизнес-процессы организационной системы. В свою очередь, контрактный производитель как новый элемент организационной системы, задействует собственные каналы поставки комплектующих, сырья и материалов, а также подрядные организации для производства узлов, включая в организационную систему новых участников, добавляющих технологическую ценность в конечную продукцию для заказчика. Тем самым, формируется распределенная сеть исполнения бизнес-процессов по созданию технологической ценности, образуя организационную систему, объединенную единой конечной целью.

Предложенные преобразования были внесены в модель и проведена имитация той же длительности в этом случае.

Теперь процесс производства в компании ЦНС инициируется поступлением собранных модулей принтеров от контрактного производителя. Компания берет

на себя задачи осуществления входного тестирования, итоговой сборки, брендирования продукции, и упаковки для транспортировки конечному пользователю.

В результате построения модели было установлено, что среднее время производственного цикла внутри организации составляет порядка девяти нормо-часов. За производственный цикл длительностью один месяц подряд успевают произвести не более 20 единиц продукции, при этом всегда есть несколько запасных моделей на случай обнаружения брака или несоответствия технической и конструкторской документации. Таким образом, время производства одного принтера в нормо-часах существенно сокращается.

Себестоимость одного принтера складывается теперь из стоимости подрядчика за единицу (170 тыс. рублей), а также внутренних производственных расходов организации ЦНС (порядка 10 тыс. рублей). Итого общая себестоимость принтера при контрактном производстве составляет 180 тыс. рублей.

Данное модельное исследование позволяет сделать вывод, что изменение организационной системы компании ЦНС на сетевую распределенную систему позволяет получить существенные преимущества как с точки зрения экономии на себестоимости (снижение на 12 %), так и роста производительности (рост почти в два раза).

3. Внедрение результатов исследования в компанию

На основании полученных данных и подтверждения гипотезы руководством компании ЦНС было принято решение о реализации организационных изменений. В результате были запланированы и реализованы организационные и кадровые преобразования, а также изменения в бизнес-процессах. Рассмотрим их подробнее.

Кадровые изменения.

Для обеспечения перехода на контрактное производство были произведены кадровые изменения, связанные с исключением отдела производства, включая сборщиков 3D-принтеров, контролеров ОТК, технологов и менеджера по снабжению производства. Однако, для обеспечения взаимодействия с контрактным производством потребовалось добавить позицию менеджера по контрактному производству.

Основной функционал нового сотрудника заключается в выстраивании взаимодействия с производителем, обеспечении передачи конструкторской и технической документации, сборе и отработке обратной связи по продукции, и решении операционных вопросов взаимодействия.

Организационные и процессные изменения.

Переход на внешнее производство потребовал от компании пересмотреть процессы планирования, взаимодействия между отдельными структурными подразделениями, а также взаимодействие с покупателями в рамках сервисного обслуживания. Рассмотрим эти изменения подробнее:

- процесс планирования требуемых объемов производства. В связи с длительным циклом закупки комплектующих для производства (длительностью до двух месяцев) собственное производство вызывает необходимость либо производить корректировку объемов производства не позднее, чем за три месяца до даты производства, либо формировать склад комплектующих и, как следствие, замораживать денежные средства на длительный период в виде запасов, нанимать управляющего складом, поддерживать запасы на необходимом уровне. Переход на контрактное производство позволил снизить минимальный срок изменения плановых объемов до одного месяца (срок производства партии) за счет передачи рисков, связанных с материалами, на производителя;
- взаимодействие между отделом производства и остальными подразделениями. За счет формирования единого окна взаимодействия в лице менеджера по контрактному производству сокращается количество коммуникаций с прочими отделами, выстраиваются более эффективные горизонтальные связи, а также обеспечивается исключение дублирующей обратной связи (например, от сервиса, маркетингового отдела, партнеров и т.д.), и более прозрачный процесс отслеживания выполнения действий по отработке обратной связи путем включения дополнительной проверки в чек-лист при выходной приемке;
- взаимодействие с покупателем/потребителем в рамках гарантийного обслуживания. В связи с наличием контрактного производителя, у потребителя возникает возможность обращения напрямую к производителю с претензией, что вызывает необходимость дополнительного взаимодействия между компанией и контрактным производителем. Кроме того, определение гарантийного случая требует двух этапов — установление факта наступления гарантийного случая в компании, и согласование результатов оценки с производителем в связи с необходимостью последующей компенсации контрактным производителем понесенных расходов.

В результате перехода на контрактное производство удалось добиться:

- уменьшения расходов на ФОТ на 1 062 000 рублей в месяц;

- снижения времени производства единицы 3D-принтера от 20 до 30 % в зависимости от модели;
- сокращения времени на отработку обратной связи. Изменения, связанные с процессом сборки/производства, могут быть осуществлены уже в следующей партии продукции;
- снижения себестоимости продукции на 10–15 % за счет экономии на масштабе и специализации контрактного производителя.

Кроме того, наличие гарантий со стороны контрактного производителя относительно уровня качества поставляемых ими технологических ценностей позволяет говорить о повышении вероятности удовлетворенности заказчика конечной продукцией, то есть об устойчивости организационной системы и ее способности при различных изменениях внешней среды осуществлять на выходе технологическую ценность требуемого уровня качества.

Выводы

Традиционные подходы формирования организационной системы, при которых большинство уровней передается силами одного предприятия, неэффективны в условиях отраслей и рынков, управляемых потребителем, к которым относится аддитивная отрасль. В результате давления изменяющихся факторов внешней среды, а также в связи с инновационностью

каждого технологического решения для заказчика, организационные системы промышленных предприятий аддитивной промышленности теряют способность производить технологические ценности заданного качества с учетом собственных интересов к доходности этой системы, то есть теряют свою устойчивость. Предлагаемый подход к формированию модели сетевой распределенной организационной системы позволит решить эту проблему и преодолеть барьеры, с которыми сталкиваются предприятия аддитивной промышленности в настоящее время.

Имитационное моделирование сетевой распределенной организационной системы позволило сделать предположение об эффективности предлагаемой модели.

Апробация на примере действующего предприятия аддитивной промышленности позволила продемонстрировать эффект от ее реализации, который заключается в сокращении расходов на оплату труда исполнителей, сокращении длительности коммуникаций в организационной системе, что в итоге привело к сокращению времени производства на 20–30 % (в зависимости от требуемых показателей качества разрабатываемой технологической ценности), а также снижению себестоимости на 10–15 %. Новые условия позволяют говорить о повышении вероятности поставки конечному потребителю технологической ценности, удовлетворяющей всем требуемым параметрам качества.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цыганков Н.С. Методы и модели планирования и оперативного управления процессами создания аддитивного оборудования на примере экструзионных 3D-принтеров: дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2022. 149 с.
2. Красовский Д.Л., Туккель И.Л. Категории «наблюдаемость» и «управляемость» инновационных процессов // Системный анализ в проектировании и управлении: сборник научных трудов XXVI Международной научно-практической конференции, 13–14 октября 2022 года. 2022. В 3 частях, ч. 3. С. 69–75.
3. Цыганков Н.С., Петрунина А.Э. Способ оценки состояния подразделений разработки экструзионных 3D-принтеров // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2022. Т. 24, № 2. С. 75–86.
4. Пашенко Д.С., Комаров Н.М. Стратегические альянсы и партнерские программы в новой экономике: опыт российской и мировой IT-отрасли // Мир новой экономики. 2020. № 14(1). С. 15–25.
5. Мусатова М.М. Новые индустриальные модели и системы управления в компаниях ГК «Ростех» // Мир новой экономики. 2021. Т. 15, № 4. С. 100–112.
6. Флек М.Б., Богуславский И.В., Угнич Е.А. Совершенствование организации высокотехнологичных производств: индустриальная модель // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18, № 1(2). С. 342–348.
7. Дворецкая В. В. Индустриальная модель развития организаций оборонного комплекса // Учет. Анализ. Аудит. Т. 5, № 4. С. 6–13.
8. Krasnyuk I., Kolgan M., Medvedeva Y. Development of an ecosystem approach and organization of logistics infrastructure // Transportation Research Procedia. 2021. № 54. P. 111–122.

© Петрунина Анастасия Эдуардовна (akasimova@sfu-kras.ru); Цыганков Никита Сергеевич (cyganikita@yandex.ru);
 Москалев Александр Константинович (ak_moskalev@mail.ru)
 Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ ВНУТРЕННИХ УГРОЗ В ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

ALGORITHM FOR DETECTING INTERNAL THREATS IN INFORMATION SYSTEM

**D. Reshetnikov
E. Ivanov
E. Amelyutin
A. Selin**

Summary. This article presents an algorithm for threat detection and prevention using neural network based on multilayer perceptron and ARIMA model. Based on the algorithm, software is developed and tested with subsequent evaluation of performance in simulation of malicious actions. The aim of the work is to demonstrate an effective algorithm that can detect malicious actions with sufficient accuracy.

Keywords: information systems, internal threats, information security, ARIMA, neural networks.

Решетников Даниил Дмитриевич

МИРЭА — Российский технологический университет
r.daniil1@outlook.com

Иванов Егор Андреевич

МИРЭА — Российский технологический университет
ktaw2@yandex.ru

Амелютин Евгений Вячеславович

Доцент, МИРЭА — Российский технологический университет
amelyutin9@yandex.ru

Селин Андрей Александрович

Доцент, МИРЭА — Российский технологический университет
chuknor@yandex.ru

Аннотация. В данной статье представлен алгоритм для обнаружения и предотвращения угроз с использованием нейронной сети на основе многослойного перцептрона и модели ARIMA. На основе алгоритма разработано программное обеспечение и проведено тестирование с последующей оценкой работы при симуляции злоумышленных действий. Цель работы — продемонстрировать эффективный алгоритм, позволяющий определять злоумышленные действия с достаточной точностью.

Ключевые слова: информационные системы, внутренние угрозы, информационная безопасность, ARIMA, нейронные сети.

Введение

В настоящее время существует большое количество программных решений по идентификации, а также принятия решений по их устранению злоумышленных действий [1]. К ним также относят средства по мониторингу действий пользователей:

1. Отслеживание времени (Tick);
2. Мониторинг сотрудников (Apploeye);
3. Обнаружение угроз (OSSEC);
4. Предотвращение угроз (Trellix IPS);
5. Предотвращение от утечек данных (СёрчИнформ КИБ);
6. Анализ поведения пользователей (NuPIC);
7. Управление событиями безопасностями (IBM QRadar).

Программы Tick и Apploeye не имеют функционала, ориентированного на безопасность компании, их основная задача — повышение продуктивности сотрудников за счет их контроля на рабочем месте и фокусирования их внимания на работе, а не посторонних задачах.

Программные продукты NuPIC и OSSEC бесплатны в использовании и имеют базовый функционал, для обнаружения злоумышленных действий сотрудников. Однако, NuPIC имеет сложный алгоритм и применяется

как библиотека при написании программ. OSSEC, в свою очередь, не имеет большого функционала для обнаружения угроз.

Программа Trellix IPS позволяет анализировать сетевой трафик и собирать информацию с маршрутизаторов и коммутаторов для обнаружения девиантного поведения в сети. СёрчИнформ КИБ предотвращает утечку информации из компании зашифровывая файлы, выходящие за пределы сети. Решение от компании IBM использует многоуровневую оценку рисков на основе искусственного интеллекта, упрощая поиск, поскольку уведомление будет отображено только при самых важных случаях. Такие программы требуют больших вычислительных ресурсов для корректного функционирования. В результате, актуальной задачей в плане обнаружения внутренних угроз является разработка собственного программного обеспечения.

Алгоритм обнаружения угроз

В реализованной системе мониторинга используются три модуля: первый собирает данные для анализа на стороне пользователя, второй выполняет прогнозы на их основе, а третий визуализирует полученную информацию на стороне клиента.

При реализации первого модуля использовалась PostgreSQL с целью сохранения информации в базе данных. В нём также применяется auditd для создания правил и дальнейшего их поиска в системном журнале при помощи journalctl. Цикл работы первого модуля представлен на рисунке 1:

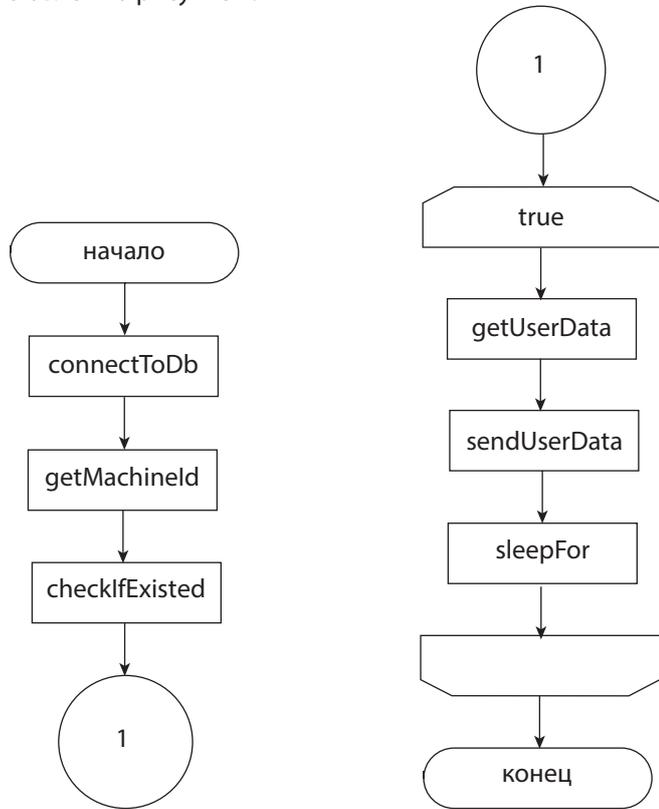


Рис. 1. Цикл работы первого модуля

В первом модуле происходит подключение к базе данных (connectToDb) и получение с компьютера пользователя machineld для его идентификации в базе данных (getMachineld). Затем, используя данный идентификатор, происходит проверка наличия пользователя в базе данных и, при его отсутствии, создает новую запись о новом устройстве (checkIfExisted). Затем в бесконечном цикле происходит сбор (getUserData) и отправление (sendUserData) информации о сетевом трафике и нарушениях из системного журнала в базу данных с заранее заданным интервалом в одну минуту (sleepFor).

При реализации второго модуля для прогнозирования данных о пользователе используются библиотеки ctsa [2] и mlpack [3]. Библиотека ctsa применяется для анализа временных рядов и моделирования на основе модели ARIMA [4]. В свою очередь mlpack позволяет быстро и интуитивно понятной для реализации нейронной сети. Цикл работы второго модуля представлен на рисунке 2.

Во втором модуле происходит подключение к базе данных (connectToDb) и проверки на существование модели на основе многослойного перцептрона

(isModelExists). После этого в бесконечном цикле запрашиваются данные пользователей из базы данных (getUsersData) и выполняется прогнозирование на основе полученных данных с использованием модели ARIMA (getPredictedFromArima). Затем эта информация отправляется в базу данных (sendPredictedNetworkUsage) и запрашивается текущее количество пользователей (getEmployeeAmount) для получения его действий (retrieveEmployeeActions) и прогнозирования следующего действия (getNextAction), а также получения количества нарушений (retrieveViolationsAmount). После этого следующее действие отправляется в базу данных (sendPredictedAction) и производится приостановка на одну минуту (sleepFor).

Третий модуль использует фреймворк Qt для визуализации данных. Блок-схема работы третьего модуля представлена рисунке 3.

При запуске данной программы происходит установка соединения с базой данных (initConnection). После подключения устанавливается таймер для обновления информации на экране пользователя, применяя запросы к базе данных с периодичностью в одну минуту (launchTimer). Далее одновременно происходит визуализация данных о нагрузке на сетевой трафик (updatePlot), вывод на экран круговой диаграммы о типах нарушений (updateChart), а также таблицу со списком пользователей, количество их нарушений и возможное следующее действие (updateTableData). На рисунке 4 представлено окно графического интерфейса системы мониторинга с отображением информации из тестовой базы данных:

Тестирование и оценка алгоритмов по идентификации угроз

Для проведения тестирования были созданы правила auditd. Их список представлен далее (1):

- w /bin/firefox -p x -k firefox_exec
 - w /bin/apt -p x -k program_apt_install
 - w /bin/dpkg -p x -k program_dpkg_install
 - w /etc/shadow -p rwa -k shadow_actions
- (1)

После обнаружения злоумышленных действий с использованием auditd, информация загружается в базу данных. Далее представлен SQL-запрос, который отображает список пользователей с количеством их нарушений и их возможному следующему действию (2):

```

SELECT      username, violations_amount, name AS
            pred_action
FROM        employee AS e
INNER JOIN  actions_predictions AS a ON e.id =
            a.user_id
INNER JOIN  action_patterns AS p ON predicted_
            action = p.id;
    
```

(2)

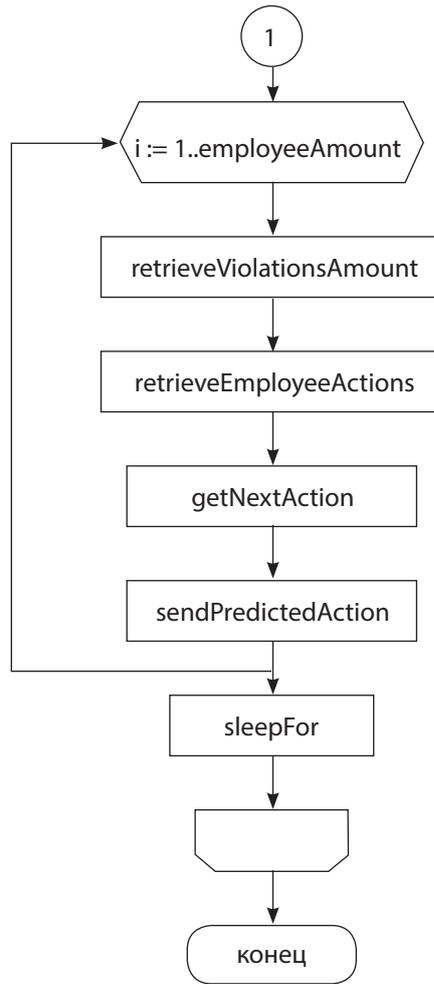
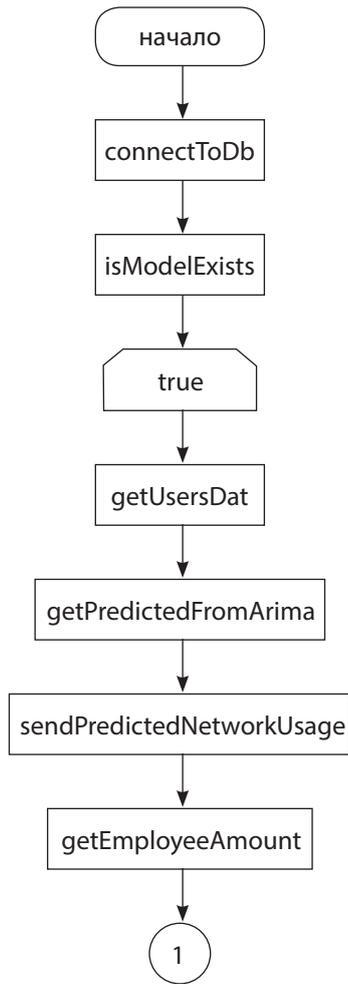


Рис. 2. Цикл работы второго модуля

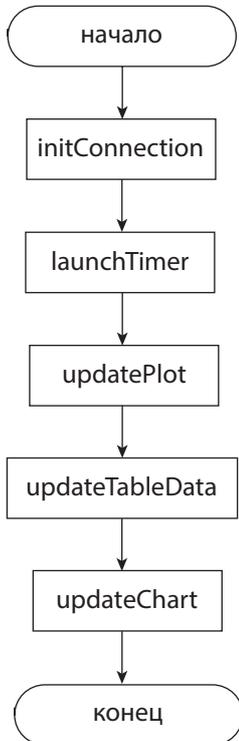


Рис. 3. Цикл работы третьего модуля

Результат выполнения SQL-запроса (2) для отображения данных о пользователях на основе тестовых данных (рисунок 5).

Эффективность работы системы мониторинга рассчитывается относительно точности используемых в ней моделей. Для её проверки используется метрика Accurasy [5]. Она представляет из себя сумму правильных предсказаний, разделённую на общее количество данных (формула 1):

$$ACC = \frac{TP + TN}{TP + TN + FN + FP} \quad (1)$$

где TP — количество истинно положительных результатов,
 TN — количество истинно отрицательных результатов,
 FN — количество ошибок второго рода,
 FP — количество ошибок первого рода.

Для тестирования была взята информация о пользователях из базы данных, заполненная случайными

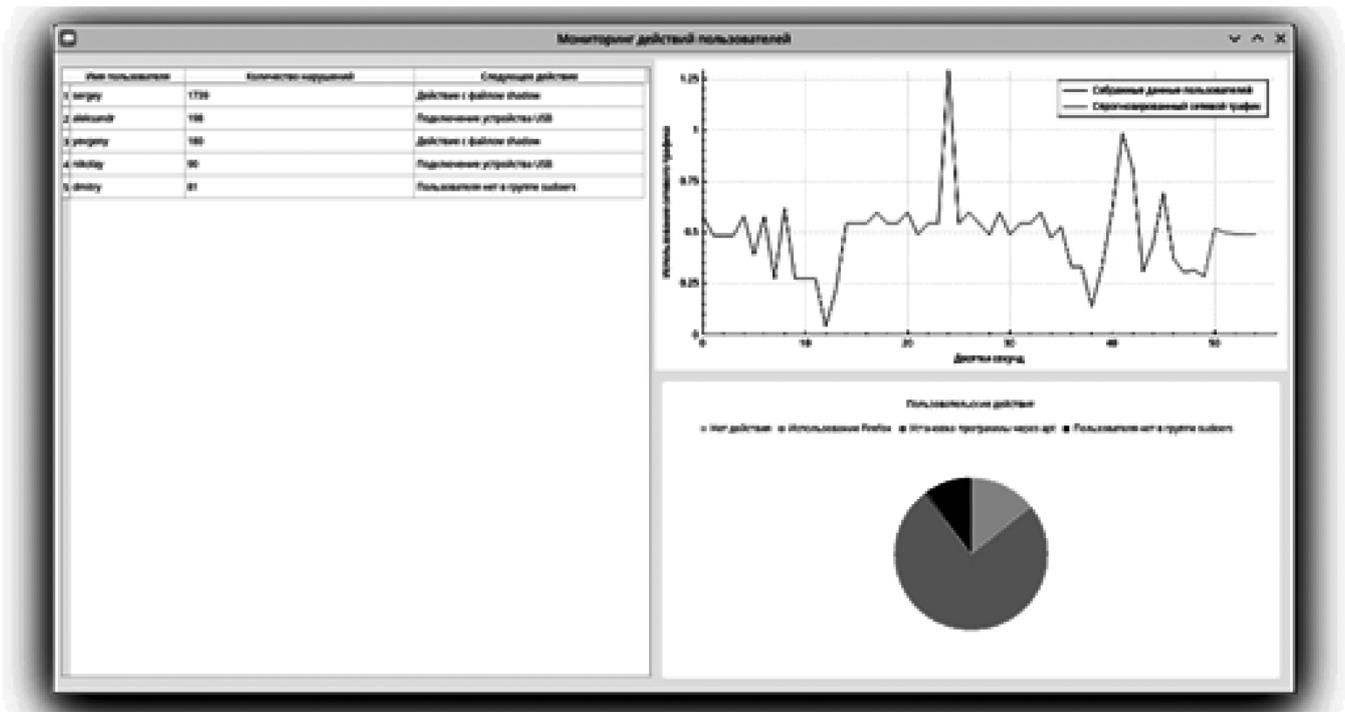


Рис. 4. Графический интерфейс системы мониторинга

username	violations_amount	pred_action
1 nikolay	90	Подключение устройства USB
2 dmitry	81	Пользователя нет в группе sudoers
3 aleksandr	198	Подключение устройства USB
4 sergey	1739	Действие с файлом shadow
5 yevgeny	180	Действие с файлом shadow

Рис. 5. Результат выполнения SQL-запроса

данными. Полученные сведения представляют 200 различных массивов, содержащих действия пользователя. Перед использованием метрики Ассигасу исходные данные для обучения модели были разделены на обучающие (150 ед.) и тестовые (50 ед.).

Формула 1 рассчитывается после обучения модели с последующей визуализацией результата. Результат применения метрики Ассигасу (рисунок 6):

Train error: 0.946667
Test error: 0.88

Рис. 6. Результат расчёта метрики Ассигасу

Как видно по рисунку 6, обученная модель обладает высокой точностью к прогнозированию действий пользователя: 95 % правильно спрогнозированных действий на данных для обучения и 88 % на тестовых.

Для проверки модели ARIMA в качестве метрики используется среднеквадратичная ошибка (MSE) [6]. Формула расчёта ошибки (2):

$$\varepsilon = \hat{x} - x \tag{2}$$

где ε — ошибка модели, x — вектор наблюдений, \hat{x} — прогнозы модели.

Формула MSE (3):

$$MSE(\varepsilon) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^m \varepsilon_j^2 \tag{3}$$

где ε — ошибка модели,
 n — количество наблюдений.

Тестирование на основе метрики MSE осуществлено аналогично метрике Ассигасу — выполнение запроса к базе данных для получения информации о использовании сетевого трафика пользователями (50 ед. вещественных значений). Формула 3 была применена после обучения модели с отображением рассчитанной ошибки. Результат показывает высокую точность модели ARIMA (рисунок 7):

Mean squared error ARIMA: 0.0390749

Рис. 7. Результат расчёта среднеквадратичной ошибки

Заключение

В статье был описан алгоритм работы для каждой программной компоненты. Кроме того, он позволяет определить злоумышленные действия заранее, за счёт

применения модели ARIMA и нейронной сети на основе многослойного персептрона.

Результатом реализации алгоритма стало программное обеспечение по обнаружению злоумышленных действий. Разработанное программное обеспечение позволяет определять девиантное поведение и прогнозировать использование сетевого трафика.

ЛИТЕРАТУРА

1. Employee Monitoring Software — URL: <https://www.getapp.com/hr-employee-management-software/employee-monitoring/> (дата обращения 10.06.2024)
2. CTSА: A Univariate Time Series Analysis and ARIMA Modeling Package in ANSI C. — URL: <https://github.com/rafat/ctsa> (дата обращения 14.07.2024)
3. mlpack: a fast, header-only machine learning library. — URL: <https://github.com/mlpack/mlpack> (дата обращения 14.07.2024)
4. ARIMA & SARIMA: Real-World Time Series Forecasting. — URL: <https://neptune.ai/blog/arima-sarima-real-world-time-series-forecasting-guide> (дата обращения 14.07.2024)
5. Vujović Ž. et al. Classification model evaluation metrics //International Journal of Advanced Computer Science and Applications. — 2021. — Т. 12. — №. 6. — С. 599–606.
6. Hodson T.O., Over T.M., Foks S.S. Mean squared error, deconstructed //Journal of Advances in Modeling Earth Systems. — 2021. — Т. 13. — №. 12. — С. e2021MS002681.

© Решетников Даниил Дмитриевич (r.daniil1@outlook.com); Иванов Егор Андреевич (kmaw2@yandex.ru);
Амелютин Евгений Вячеславович (amelyutin9@yandex.ru); Селин Андрей Александрович (chuknor@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ОПТИМИЗАЦИЯ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ПРОФИЛАКТИЧЕСКОЙ РАБОТЫ УЧАСТКОВЫХ УПОЛНОМОЧЕННЫХ ПОЛИЦИИ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Рогожкин Виктор Андреевич

Адъюнкт, Академия управления МВД России
vrogzhkin@internet.ru

OPTIMIZATION OF INDIVIDUAL PREVENTIVE WORK OF DISTRICT POLICE OFFICERS: PROBLEMS AND PROSPECTS

V. Rogozhkin

Summary. The article examines the problems of individual preventive work carried out by district police officers and proposes a new model for managing this activity. In current practice, the lack of consideration of individual characteristics of persons on preventive accounting reduces work efficiency. The author suggests using a decision support system and a more comprehensive approach, which will allow you to focus on the most problematic categories of people.

Keywords: protection of public order, individual preventive work, prevention of offenses, local police commissioner, model of the management system of individual preventive work.

Аннотация. В статье рассматриваются проблемы индивидуальной профилактической работы, проводимой участковыми уполномоченными полиции, и предлагается новая модель управления этой деятельностью. В текущей практике недостаток учета индивидуальных особенностей лиц на профилактическом учете снижает эффективность работы. Автор предлагает использовать систему поддержки принятия решений и более комплексный подход, что позволит сконцентрировать усилия на наиболее проблемных категориях лиц.

Ключевые слова: охрана общественного порядка, индивидуальная профилактическая работа, профилактика правонарушений, участковый уполномоченный полиции, модель системы управления индивидуальной профилактической работы.

Введение

Одной из основных задач органов внутренних дел Российской Федерации является выявление лиц, намеревающихся совершить преступление и постановка их на профилактический учет [1]. Подразделения участковых уполномоченных полиции играют ключевую роль в структуре органов внутренних дел, реализующим эту задачу (далее — УУП). Кроме того, одной из форм несения службы УУП является индивидуальная профилактическая работа с лицами, проживающими на закрепленном за ним административном участке [2]. В соответствии с наставлением УУП проводит индивидуальную профилактическую работу с четырьмя категориями граждан, предоставленными в Таблице 1.

Однако исследования асоциального поведения, проводившиеся учеными такими как Гилинский Я.И., Змановская Е.В. Клейберг Ю.А. и др. [5, с. 182; 6, с. 450; 7, с. 192], показывают, что помимо нормативно-урегулированных обязанностей, необходим индивидуальный подход к каждому профилактируемому лицу.

В целях профилактики преступлений, совершаемых лицами, стоящими на профилактическом учете в органах внутренних дел и оптимизации повседневной деятельности УУП, становится актуальным построение модели системы управления индивидуальной профилактической

Таблица 1.

Категория лиц, с которыми УУП проводят индивидуальную профилактическую работу

№ п/п	Категория лиц, состоящих на учете	Посещение по месту жительства
1.	В отношении которых установлен административный надзор	Не реже одного раза в месяц
2.	Освобожденными из мест лишения свободы и имеющими непогашенную или неснятую судимость за совершение тяжкого или особо тяжкого преступления; преступления при рецидиве преступлений; двух и более преступлений, предусмотренных частью первой статьи 228, статьей 228.3, частью первой статьи 231, частью первой статьи 234.1 УК; умышленного преступления в отношении несовершеннолетнего	Не реже одного раза в месяц
3.	Допускающими правонарушения в семейно-бытовой сфере	Не реже одного раза в месяц
4.	Совершившими административные правонарушения, посягающие на общественный порядок и общественную безопасность при проведении публичных или официальных спортивных мероприятий	Не реже одного раза в квартал

ской работы с лицами, состоящими на профилактическом учете (далее — СУ ИПР). Ранее проведенным исследованием было установлено, что подразделения УУП являются типичной открытой организационной системой, обладает ее характеристиками и подчиняется законам теории управления [4].

Зная общую структуру подразделений УУП в органах внутренних дел, их функции и задачи, опираясь на методы и подходы теории управления [8, с. 27], можно построить модель СУ ИПР. В модели представлены следующие составные элементы: лицо, состоящее на профилактическом учёте (основной из характеристик которого является его поведение в во внешней среде, на формирование которого будет направлено корректирующее воздействие УУП); подразделение УОУУП и ПДН на региональном уровне, которое будет осуществлять организацию, методическое руководство, координацию и регулирование индивидуальной профилактической работы, социально-бытовая среда (круг общения, бытовая среда, экономическая ситуация, политическая обстановка), а также система управления, состоящая из отдела УУП и системы поддержки принятия управленческих решений.

Целевой задачей СУ ИПР является сокращение между приемлемым уровнем противоправного поведения профилактируемых лиц с их реальными значениями. Исходя из вышеизложенного, упрощённое описание модели СУ ИПР можно представить с использованием теоретико-множественного подхода (формула 1):

$$СУИПР = \{K, U, S, V, L\} \quad (1)$$

где K — множество элементов СУ ИПР (формула 2),
 U — функция корректирующего воздействия;
 S — функция выходных характеристик профилактируемого;

V — функция координирующего воздействия;
 L — функция воздействия социально бытовой среды.

$$K = \{OU, CyU, СППР, ОС\}, \quad (2)$$

где OU — объект управления;
 CyU — субъект управления;
 $СППР$ — система поддержки принятия решений;
 $ОС$ — обратная связь.

Визуальное представление модели СУ ИПР УУП представлено на рисунке 1.

Координирующее воздействие $V(t)$ представлено в виде подразделения Управления организации деятельности УУП на региональном уровне, которое осуществляет организационно-методическое руководство и координацию деятельности подразделений УУП и ПДН территориальных органов МВД России на районном уровне по вопросам, отнесенным к их компетенции. $V(t)$ в качестве обратной связи поступает на систему принятия решений и трансформируется в корректирующее воздействие $U(t)$ — В качестве OU в данной системе выступают профилактируемые лица, а именно их асоциальное поведение.

Система принятия решений представлена непосредственно отделом УУП и СППР — системой поддержки принятия решений. СППР основана на сервисах Единой информационно-аналитической системы обеспечения деятельности МВД России (далее — ИСОД МВД России), состоящей из совокупности вычислительных средств обработки информации, средств хранения информации, расположенных в центрах обработки данных и программно-технических комплексов единого информационного пространства, сервисов ИСОД МВД России,



Рис. 1. Система управления индивидуальной профилактической работой

интегрированной мультисервисной телекоммуникационной сети, а так же автоматизированного рабочего места оператора.

Выходные координаты $S(t)$ ОУ (асоциальное поведение) выступают в качестве влияния на социально-бытовую среду, а также негативное, либо положительно влияние среды на профилактируемое лицо — $L(t)$. Социально-бытовая среда создает внешнее возмущающее воздействие X_c на объект управления и анализируются СППР.

Объект управления — лицо, состоящее не профилактическом учете — имеет множество индивидуальных характеристик:

$$OU = X = (X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_c),$$

где X_1 = антропометрические признаки [8];

X_2 = категория профилактического учета;

X_3 = совершение преступлений;

X_4 = совершение административных правонарушений;

X_5 = делинквентное (пред преступное поведение);

X_6 = наличие химического аддитивного (зависимого) поведения;

X_c = влияние социально-бытовой среды.

Формирование поведения профилактируемого лица происходит под влиянием множества факторов, начиная от воздействия социально-бытовой среды и заканчивая проведением индивидуальной профилактической работы. Участковые уполномоченные полиции могут использовать различные формы профилактического воздействия, включая правовое информирование, профилактические беседы, административный надзор, а также визиты по месту жительства. Несмотря на сложность признаков, характеризующих профилактируемое лицо, характеристика социально-бытовой среды остаётся одним из наиболее сложных элементов для оценки, которую можно представить в следующем виде (формула 4) [9, с. 145]:

$$X_c = (X_{c1}, X_{c2}, X_{c3}, X_{c4}, X_{c5}, X_{c6}, X_{c7}),$$

где X_{c1} — степень структурированности ландшафтной застройки;

X_{c2} — географические условия;

X_{c3} — экологическая ситуация;

X_{c4} — уровень безработицы;

X_{c5} — уровень образования населения;

X_{c6} — круг общения;

X_{c7} — бытовые условия.

На основании изложенного, можно прийти к выводу, что общепринятый формат проведения индивидуаль-

ной профилактической работы с под учётными, который выражается в единообразном подходе без учета индивидуальных особенностей и внешней среды, является бесперспективным и трудозатратным. В то время как предлагаемый автором метод позволит уделить внимание лицам с наиболее выраженным асоциальным поведением. Кроме того, в повседневную деятельность УУП внедрен сервис СООП ИСОД МВД России, который в настоящий момент имеет фундаментальные показатели девиантного поведения (судимости, административные правонарушения, профилактический учет, доставления в органы внутренних дел и др.).

Таким образом, в подразделении участковых уполномоченных необходимо разработать и внедрить комплекс мероприятий и последовательность действий в индивидуальной профилактической работе с профилактируемыми лицами, которые должны способствовать достижению желаемого поведения, учитывая их текущие особенности и применяя систему поддержки принятия решений через модернизированный модуль «Участковый» СООП ИСОД МВД России.

Для дальнейшего развития предложенной модели будет проведено дополнительное исследование, направленное на оптимизацию управления в СУ ИПР и выполнение кластерного анализа асоциального поведения лиц, находящихся на профилактическом учете. Это позволит более точно предсказывать и предотвращать правонарушения, улучшая общую эффективность работы полиции на местах.

Заключение

В данной статье проанализированы существующие проблемы индивидуальной профилактической работы, проводимой участковыми уполномоченными полиции, и предложена новая модель управления этой деятельностью. В рамках исследования была разработана и описана система управления индивидуальной профилактической работы (СУ ИПР), включающая использование системы поддержки принятия решений (СППР), что позволит повысить эффективность профилактической работы за счет учета индивидуальных особенностей лиц, состоящих на профилактическом учете.

Предложенная модель управления позволяет сосредоточить усилия на наиболее проблемных категориях граждан, что может существенно сократить уровень противоправного поведения. Введение системного подхода к управлению, интеграция современных информационных технологий, таких как ИСОД МВД России, способствует более точному и оперативному реагированию на возможные угрозы общественному порядку.

ЛИТЕРАТУРА

1. Приказ МВД России от 17.01.2006 г. № 19 (ред. от 29.09.2022 г.) «О деятельности органов внутренних дел по предупреждению преступлений» (вместе с Инструкцией о деятельности органов внутренних дел по предупреждению преступлений) / Документ опубликован не был.
2. Приказ МВД России от 29 марта 2019 г. № 205 «О несении службы участковым уполномоченным полиции на обслуживаемом административном участке и организации этой деятельности» (вместе с «Инструкцией по исполнению участковым уполномоченным полиции служебных обязанностей на обслуживаемом административном участке», «Наставлением по организации службы участковых уполномоченных полиции») / СПС «Гарант». — URL: <http://base.garant.ru/72288134/> (дата обращения: 20.08.2024).
3. Адам Ю.И. Склонность к физическому риску у мужчин: связь с биосоциальной адаптацией на примере российской выборки: специальность 03.03.02 «Антропология»: диссертация на соискание ученой степени кандидата исторических наук / Адам Юлия Игоревна, 2021. — 186 с. — EDN UKQPSL.
4. Вопросы эксплуатации программного обеспечения для реализации Сервиса обеспечения охраны общественного порядка: Приказ МВД России от 11 января 2016 г. № 1 // СПС СТРАС ЮРИСТ (дата обращения: 20.08.2024).
5. Гилинский Я.И. Социология девиантности (новеллы и перспективы) // Социологические исследования. — 2009. — № 8 (304). — С. 70–73. интеллекта для выявления девиантного поведения в молодежной среде // Охрана, безопасность, связь. — 2022. — № 7–1. — С. 181–187.
6. Змановская Е.В. Психология девиантного поведения: структурно-динамический подход: дис. ... д-ра психол. наук: — СПб., 2006. — 450 с.
7. Клейберг Ю.А. Социальная психология девиантного поведения: Учебное пособие для вузов. — М.: ТЦ Сфера, 2004. — 192 с.
8. Кубасов И.А. Проблемные вопросы управления отделом участковых уполномоченных полиции и по делам несовершеннолетних как организационной системой / И.А. Кубасов, В.А. Рогожкин // Академическая мысль. — 2023. — № 4(25). — С. 25–28. — EDN URXQSI.
9. Леонова З.К. Психология окружающей среды, или влияние окружающей среды на поведение человека / З.К. Леонова, А.Д. Смирнова // Развитие профессионализма. — 2016. — № 1(1). — С. 144–145. — EDN YIDKEP.

© Рогожкин Виктор Андреевич (vrogozhkin@internet.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ПРОБЛЕМА КАДРОВОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОРГАНОВ ВНУТРЕННИХ ДЕЛ

SYSTEM ANALYSIS AND THE PROBLEM OF STAFFING OF INTERNAL AFFAIRS BODIES

A. Rybak

Summary. The article deals with the issues of applying system analysis in the management of staffing of internal affairs bodies. Based on the analysis of the present circumstances, it was concluded that there are systemic causes of the problem and the need for a systemic solution accordingly. For this purpose, it is proposed to use the previously developed by him standard procedure of system analysis for various spheres of activity, including the process of staffing of internal affairs bodies. The paper presents the technology of solving service tasks by territorial bodies of internal affairs of Russia based on application of the mathematical model of dynamic equilibrium of operational situation parameters.

Keywords: management, personnel support, system approach, analysis, model, dynamics.

Рыбак Александр Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
почетный работник сферы образования РФ, профессор,
Дальневосточный юридический институт МВД России
rybak_2908@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы применения системного анализа в управлении кадровым обеспечением органов внутренних дел. На основе анализа сложившейся обстановки автор приходит к выводу о системных причинах этой проблематики и необходимости, соответственно, системного решения. Для этого предлагается использовать разработанную им ранее типовую процедуру проведения системного анализа для различных сфер деятельности в том числе процесса кадрового обеспечения органов внутренних дел. В работе представлена технология решения служебных задач территориальными органами внутренних дел России на основе применения математической модели динамического равновесия параметров оперативной обстановки.

Ключевые слова: управление, кадровое обеспечение, системный подход, анализ, модель, динамика.

Всестороннее исследование управленческих отношений, которые стали реальностью на протяжении последних нескольких лет в сфере деятельности органов внутренних дел, позволяет отметить появление ряда негативных процессов, которые нельзя нейтрализовать точечными управленческими воздействиями. Прежде всего обращает на себя внимание кадровая проблема, которая проявилась в последнее десятилетие и продолжает развиваться по нарастающему сценарию. Последние несколько лет руководство МВД РФ открыто заявляет о том, что некомплект служащих достиг критической отметки. По состоянию на осень 2023 г. некомплект оценивался в 100 тыс. единиц. Несмотря на упрощение порядка поступления на службу, исключения ряда традиционных институтов (в частности, личное поручительство), а также ряд других мероприятий, ситуация с кадрами значительного улучшения не демонстрирует. Указанные обстоятельства на прямую влияют на профессиональную и личностную психологическую перегруженность сотрудников, отражаются на микроклимате в коллективе, создавая препятствия для личностного роста и профессионального развития личного состава. Последствием постоянных физических, психологических и эмоциональных перегрузок сотрудников является их быстрая утомляемость, раздражительность, растущее количество ошибочно принятых решений, снижение скорости выполнения действий по решению профессиональных задач, либо поспешность в их реализации. Все

это крайне негативно влияет на результаты работы подразделения. Указанные психофизиологические процессы отрицательно сказываются на уровне правосознания сотрудников, вызывая его деформацию, что проявляется в виде нежелания либо профессиональной неспособности адекватно квалифицировать ситуацию и оказывать соответствующее правовое воздействие. Сотрудники ОВД, не справляясь с такими повышенными нагрузками, «палочной системой» оценки их деятельности, текущим уровнем материального довольствия, не компенсирующим затраты их психической энергии, «голосуют ногами».

Не менее проблематична ситуация с набором на службу в органы внутренних дел гражданского населения.

В современном российском обществе, как и во всем мире, произошли коренные изменения, связанные с активным внедрением современных информационных технологий и прежде всего интернета во все сферы жизни человека. Именно интернет, социальные сети, преобразуя повседневную жизнь человека через его профессиональный и личный опыт, изменяет и формирует саму личность, изменяя ее ценности.

Главным дефицитом в этих условиях для гражданина (пользователя социальных сетей) становятся эмоции. Политические и даже экономические интересы уходят

на второй план. Т.е., в настоящее время мы можем наблюдать серьезную трансформацию норм массового поведения, смену доминирующей мотивации. Она проявляется в том, что индивидуум на сегодняшний день имеет отчетливую склонность приносить в жертву свои интересы ради того, чтобы получить новые эмоции — даже скоротечных и не значимых для его жизненного успеха.

Такая форма доминирующей мотивации безусловно тормозит его развитие. Хаотичное потребление эмоций без всякого управления, а значит напряжения и усилий, приводит к появлению не столько гибкой, сколько мозаичной личности, которая может в одно и то же время испытывать широкий спектр чувств и с противоположным знаком оценивать различные события и явления современной жизни [7]. Основной ценностью такой личности является только одна — личный комфорт.

При этом следует учитывать, что современные маркетинговые технологии настроены на автоматическое формирование комфортной для каждого пользователя социальной среды, на получение в опережающем его желание формате обеспечивающей информации, подкрепляющую его систем взглядов, лишает стимулов к развитию и желания выйти из так называемой зоны комфорта. Прогресс такой личности блокируется комфортом надежней чем внутренние или внешние запреты.

В этих условиях традиционные методы и принципы кадровой политики органов внутренних дел обречены на низкую эффективность. Для большинства населения ежегодный бесплатный проезд сотрудников до мест отдыха и ранний выход на пенсию не является достаточно привлекательным по сравнению с ненормированным рабочим днем, сравнительно невысоким уровнем денежного довольствия и большими психическими нагрузками на службе.

В этих условиях даже повышение денежного довольствия не решит полностью кадровую проблему органов внутренних дел. Безусловно, на какой-то период появится «скамейка запасных», в какой-то степени решатся вопросы дефицита кадров, но появится проблема высокой ротации и низкого профессионализма. Причина носит системный характер и заключается в потере соответствия действующих управленческих отношений в системе МВД России изменившейся внешней среде. Т.е., не соблюдается одно из основных требований к системам управления — требование динамичности, которое заключается в необходимости оперативного реагирования субъекта управления на все изменения внешней среды и дезорганизующие воздействия внутри самой системы управления. Налицо системная проблема, которая требует, соответственно, системного решения. Но в этой плоскости тоже не все однозначно.

В настоящее время понятие системного подхода не имеет однозначного толкования и трактуется столь широко и неопределенно, что часто теряется специфика и смысл [11].

С. Оптнер рассматривает системный подход как средство изучения и разработки не всех объектов, которые называли системами, а только тех, кто является органично целым.

А. Холл представляет системный подход в виде синтеза изучения различных сторон и аспектов объекта.

Ю. Черняк считает, что системный подход прямо противоположен классическому анализу, при котором сложное делится на простое. Более того, по его мнению, процесс исследования объекта должен идти по пути усложнения задачи с целью поиска и изучения наиболее полного комплекта существенных взаимосвязей.

Есть и другие точки зрения (В.Г. Шорина, Е.П. Голубова, В.Н. Садовского) на понятие системного подхода, но всех их объединяет одна главная идея: из внешней среды формируется (вычленяется) некое целостное образование, у которого обнаруживаются свойства, присущие системам. В нашем случае мы имеем дело с управленческими отношениями, поэтому изучение любой проблематики на основе системного подхода следует проводить сквозь призму понятий типовой схемы системы управления (объекта и субъекта управления, прямых и обратных связей) в целях выявления и изучения динамики наиболее существенных взаимосвязей как внутри системы управления, так и между элементами системы и элементами внешней среды.

Термин «системный анализ», как и термин «системный подход» часто используется в системных исследованиях. При этом объектом исследования в обоих случаях являются системы, а точнее — их динамика.

К сожалению, на настоящий период отсутствует единая точка зрения на сущность системного анализа и его место в научной методологии. Много в современной научной литературе противоречивых подходов к его структуре, содержанию и технологии применения. В качестве наиболее приемлемой трактовки системного анализа в широком смысле можно предложить точку зрения И.П. Стабина И.П., который рассматривал системный анализ как способ реализации системного подхода [8].

В этом случае в научном мире довольно рельефно проецируются два направления.

В первом — делается акцент на описание сложной динамической системы при помощи абстрактного моделирования, в том числе математических моделей.

На основе формального описания формулируется математическая задача оптимального развития системы, т.е. отыскание минимума или максимума целевой функции при ограниченных ресурсах.

В правоохранительной сфере такой подход может быть применен в задачах линейного программирования или в задачах динамического программирования. Например, метод линейного программирования является оптимальным инструментарием при решении задач распределения сил и средств при охране общественного порядка в сложной оперативной обстановке. Руководитель на основе модели линейного программирования получает возможность так выбрать маршруты патрульных групп, численность и частоту их следования в зависимости от времени суток, чтобы расход личного состава был минимальным, и при этом задача охраны общественного порядка была выполнена [6].

Метод динамического программирования может быть использован при разработке стратегии борьбы органов внутренних дел с террористическими структурами. Например, разрабатывается стратегия противодействия органов внутренних дел террористическим структурам по двум аспектам: жесткие и интеллектуальные направления борьбы. Наилучшее их сочетание зависит от текущего состояния проблемы, ресурсов правоохранительных структур и возможностей террористической организации. На основе моделирования террористического потенциала, восприимчивости населения к вербовке и ресурсных возможностей правоохранительных органов выбираются оптимальное сочетание обозначенных направлений борьбы [10].

Второе направление реализации системного подхода ориентировано на логику системного анализа и его

связь с принятием решения. На нем остановимся подробнее.

В рамках этого направления С. Опнер, В.Г. Шорин, Е.Г. Голубков основными элементами системного анализа считали: ВХОД, ПРОЦЕСС, ВЫХОД, обратную связь и ограничения [8].

Развитием этого подхода является предложенная И.П. Стабиным технология реализации системного анализа через типовую систему координат: компоненты (ВХОД, ПРОЦЕСС, ВЫХОД), процедуры = (ИЗМЕРЕНИЕ, ОЦЕНКА, ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЯ) и ВРЕМЯ.

Назначение и содержание обозначенных компонентов и процедур подробно изложены в предыдущих работах автора [1,3,4,5].

Технология системного анализа в данном случае представляет собой два вида процессов:

- информационное наполнение компонентов ВХОД, ПРОЦЕСС, ВЫХОД (процедура ИЗМЕРЕНИЕ);
- выявление связей между компонентами ВХОД, ПРОЦЕСС, ВЫХОД и подготовку альтернативных вариантов управленческих решений, что в свою очередь является содержанием процедур ОЦЕНКА, ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЯ.

Для автоматизации обозначенных процедур требуется программное обеспечение. На первом этапе с этой задачей вполне справляется приложение Windows СУБД Access.

В итоге классическая модель системного анализа может быть формализована с использованием трехмерной системы координат (рис. 1).

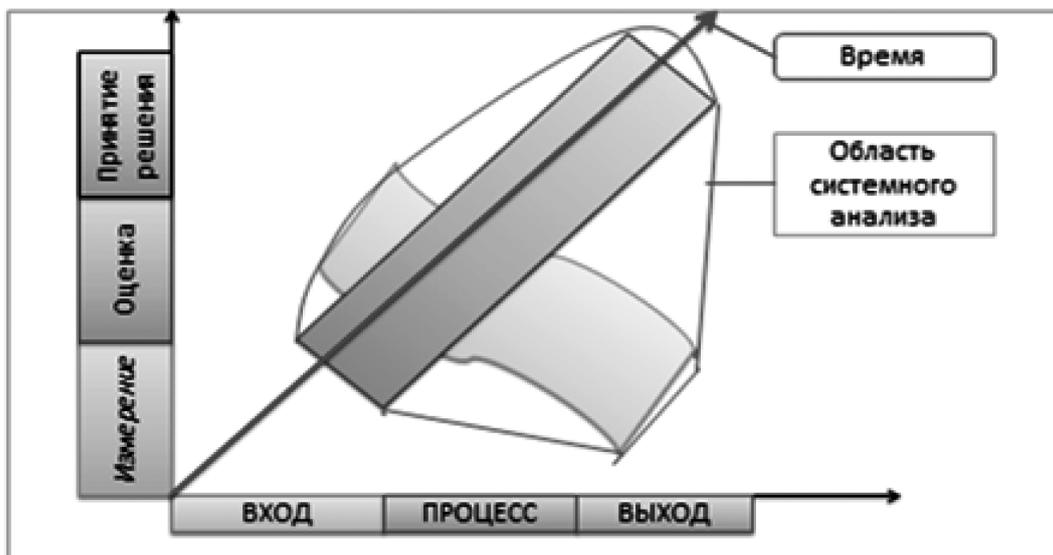


Рис. 1. Координаты системного анализа

Такая модель, по сути, представляет собой инструментарий, позволяющий руководителю (субъекту управления), выбрать направление деятельности путем мониторинга стратегических и тактических целей, предусматривающий количественный (там, где это возможно) анализ затрат ресурсов, определение эффективности и рисков, связанных с каждой альтернативой принятия решения для достижения тактических целей. При этом в рамках данного подхода системный анализ целесообразно проводить по двум уровням.

На первом уровне проводится анализ состояния субъектов и объектов управления, изучается внешняя среда, цели управления. Здесь главной задачей является сознательный поиск, выявление и формулирование проблем, мешающих системе управления решать профессиональные задачи. Именно на этом этапе очень важен междисциплинарный взгляд на проблему, умение креативно и нестандартно мыслить, что позволит правильно сформулировать проблему.

На втором уровне проводится анализ с целью идентификации проблем. Для этого используется метода исследования сложных динамических систем, это позволяет находить в них задачи и противоречия, которые препятствуют их решению. Массив преследуемых целей и задач может быть достаточно велик, при этом они могут быть противоречивыми. В этой связи для построения иерархии целей и задач требуется определиться с содержанием применяемых понятий: задача, проблема, цель.

С философской точки зрения цель — это установленный, финальный результат деятельности индивида или группы людей, для достижения которого выбирается набор методов или вполне определенных действий [13]. С другой точки зрения, цель представляет собой мотив, который направляет, систематизирует и координирует набор различных мер [14].

Несмотря на различия приведенных точек зрения, общим у них является то, что цель — это всегда вопрос, который требует решения.

В деятельности органов внутренних дел, спектр вопросов, которые необходимо решать очень широк. Поэтому для выхода из этого положения разделим все вопросы, требующие решения, на два типа: правоохранные и управленческие [15].

Благодаря правоохранительным полномочиям реализуется и поддерживается деятельность по охране общественного порядка и борьбе с преступностью, а управленческие полномочия поддерживают функции управления, включающие в себя подготовку и принятие управленческих решений, регулирование, планирование, контроль.

Отмеченные полномочия обуславливают соответствующую форму ответственности. Важнейшим условием ее реализации является наличие нормативно-правовой базы, в которой закреплены отношения ответственности. Это позволяет проводить анализ и оценку действий руководителей на предмет адекватного выполнения возложенных на них задач. Правоохранительный сегмент этих задач по своей природе трудно формализуем и практически не поддается количественной оценке. В основном нормативном документе, регламентирующем оценку деятельности территориальных органов внутренних дел России (приказ МВД России №1040 от 31 декабря 2013 г.), в качестве одного из основных критериев используется статистический показатель. К примеру, количеству уголовных дел, которые переданы в суд с обвинительным заключением за отчетный период времени.

Недостатком данного подхода, является то, что практически не учитывается сложность уголовного дела, не берется во внимание условия, в которых работает подразделение. Это влечет за собой ситуацию, когда расследованные уголовные дела, резко отличающиеся по своим трудозатратам, имеют одинаковую бальную оценку, что является деструктивным элементом в формировании мотивационной политики.

В то же время руководителю запрещено при планировании деятельности своего подразделения использовать «в качестве ожидаемого результата реализации мероприятия плана конкретного числа (минимально или максимально допустимого числа) выявленных, совершенных и раскрытых преступлений ...». Но без конкретной цели нет управления. В этих условиях он вынужден неофициально использовать для этого «пресловутый» АППГ, который никак не привязан к реальной оперативной обстановке. Как правило это приводит к падению эффективности деятельности подразделений, перегрузкам и снижению мотивации выполнения своих служебных обязанностей сотрудниками.

Таким образом, при разработке и формулировании целей деятельности территориальных подразделений различного уровня следует различать цели правоохранительной и управленческой ответственности.

Цели правоохранительной ответственности (далее правоохранительные цели), как и оценка их достижений лежат в области слабоструктурированных и неструктурированных проблем и трудно поддаются формализации. Решения всех вопросов здесь лежат в области экспертных оценок.

Цели управленческой ответственности в основном связаны с задачами оптимального распределения имеющихся ресурсов (временных, людских, материальных)

в соответствии с динамикой криминогенной обстановки. Эти задачи имеют схожие черты и вполне могут быть типизированы, а затем и формализуемы, т.е. описаны формальными (математическими) средствами.

Под проблемой предлагаем понимать разновидность вопроса, который имеет четко формализованную цель, но способы ее достижения по разным причинам не могут быть определены на данный момент времени.

Задача в свою очередь представляет собой разновидность вопроса, который имеет четко определенную цель и конкретный способ, метод или подход ее решения.

В рамках проводимого исследования проблема представляет собой дефицит кадров в территориальных подразделениях МВД России, которые должны быть укомплектованы в соответствии требованиями криминогенной обстановки в стране.

Цель уровня проблемы — объективно-общественная необходимость, которая может быть установлена и выражена набором количественных или качественных показателей, состав и пределы отклонений которых полностью в настоящий момент не могут быть определены.

С учетом вышеизложенного, считаем, что в качестве цели, сформулированной выше проблемы, можно выбрать оптимальную обеспеченность кадрами территориальных органов в соответствии с оперативной обстановкой и особенностями региона.

Цель уровня задачи предлагаем определить как объективно-общественную необходимость, которая может быть выражена некоторым набором количественных индикаторов, граничные нормы и допустимые отклонения этих индикаторов известны.

Здесь следует отметить, что в качестве количественных показателей цели не следует брать показатели результатов правоохранительной деятельности, такие как — количество раскрытых преступлений, количество расследованных преступлений, переданных в суд с обвинительным заключением и пр. Это будет провоцировать руководителей на активную реализацию планирования на основе «палочной» системы. Наиболее приемлемым подходом в этом случае является применение специально разработанных индексов, которые будут отражать эффективность использования ресурсов подразделения при решении служебных задач.

Использование представленной типовой технологии системного анализа для достижения управленческих целей кадрового обеспечения органов внутренних дел, результаты которой отражены в некоторых работах автора [4,5,6], дает возможность сформулировать пере-

чень первоочередных задач и разработать методы их оптимального решения.

В первую очередь это:

- обоснование подхода к оценке эффективности работы органов МВД России, который будет адекватно отражать необходимый уровень эффективности распределения всех видов ресурсов, которые необходимы при выполнении служебных задач;
- разработка алгоритма, который будет применяться для расчета кадровой потребности органов МВД России, и учитывать состояние оперативной обстановки и особенности конкретных территорий.

Для решения этих задач предлагаем использовать метод системной динамики. Этот метод базируется на математической модели динамического равновесия параметров оперативной обстановки [5,6].

В качестве основы модели автором предложено использовать доказанный фактор динамического равновесия параметров оперативной обстановки, находящихся в нелинейной зависимости [9].

$$\alpha = \frac{Y \cdot R}{V} \cdot \left(1 - e^{-\frac{V}{Y \cdot R}} \right), \quad (1)$$

где α — нормативный показатель расследованных преступлений при условии оптимального распределения ресурсов;

Y — расчетный показатель «оптимальной эффективности» одного сотрудника подразделения за отчетный период;

R — фактическое количество сотрудников подразделения;

V — реальная нагрузка на подразделение (в следственных подразделениях — это количество уголовных дел в производстве за отчетный период).

Ключевым элементом этой модели является показатель оптимальной эффективности $-Y$. Для его расчета предварительно проводится экспертиза, в ходе которой все преступления, регистрируемые в регионе, делятся на категории по степени сложности их расследования.

Описанная модель может найти свое применение в процессе определения потребности в персонале территориальных подразделений в зависимости от оперативной обстановки. Например, для следственных подразделений может быть установлен целевой ориентир количества расследованных преступлений α . После этого с использованием формулы (1) определяется соответ-

ствующее известным параметрам Y и V количество персонала R . При расчете Y будут приниматься во внимание территориальные отличия, максимальная нагрузка на работника и трудоемкость расследования преступлений.

Таким образом системный анализ процесса кадрового обеспечения органов внутренних дел позволил сделать следующие выводы:

- проблема «кадрового некомплекта» в органах внутренних дел носит системный характер;
- для адекватного формулирования первоочередных целей и задач необходимо отделить цели правоохранительной ответственности от целей управленческой ответственности;
- для решения управленческих задач предпочтительно использовать типовую модель системного анализа, представляющую собой базовую технологию системного исследования любой сложной сферы деятельности органов внутренних дел;

— первоначальными управленческими задачами в области совершенствования кадрового обеспечения являются расчет адаптивной кадровой потребности в зависимости от изменения криминальной обстановки и внедрение в практическую деятельность инструментария по оптимальному распределению сил и средств при выполнении служебных задач.

Безусловно, это далеко не полный перечень задач, которые необходимо решить для снятия проблемы «кадрового некомплекта» в органах внутренних дел. Вопросы повышения размеров денежного довольствия, задачи формирования привлекательности службы в органах внутренних дел и многое другое являются не менее важными и сложными. Здесь рассмотрены лишь те вопросы, которые не требуют финансового обеспечения и могут быть решены при наличии мотивации и воли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыбак А.В. Вопросы оценки деятельности следственных подразделений. Эффективность и мотивация // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки». 2020. №8/2. С. 64–69.
2. Гусев Р.Г. Методологические подходы к оценке деятельности полиции // Современное право. М.: Новый Индекс. 2012. №5. С. 81–82.
3. Рыбак А.В. Системный анализ в диссертационном исследовании. Технология и особенности применения в сфере юридических наук. // Современное педагогическое образование. 2018. №6. С. 231–236.
4. Рыбак А.В. Совершенствование управления кадровым обеспечением органов внутренних дел на основе процедур системного анализа // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023. №1. С. 130–139.
5. Рыбак А.В. Системный анализ и управление в деятельности органов внутренних дел // Научный портал МВД России, ВНИИ МВД России. 2022, №4.
6. Рыбак А.В. Подготовка и принятие управленческого решения в правоохранительной деятельности: науч.-практ. пособие // Хабаровск: РИО-ДВЮИ МВД России. 2020. 110 с.
7. Делягин М.Г. Конец эпохи: осторожно, двери открываются! Общая теория глобализации. / М.: ИПРОГ «Книжный мир». 2019. 832 с.
8. Стабин И.П. Автоматизированный системный анализ: учебник. / М.: Машиностроение. 1984. 309 с.
9. Минаев В.А. Кадровые ресурсы органов внутренних дел: современные подходы к управлению / Монография. М.: Академия МВД СССР. 1991. 193 с.
10. Минаев В.А. и др. Математические модели анализа, оценки, прогнозирования и управления в органах внутренних дел. — Хабаровск: РИО-ДВЮИ МВД России, 2022. С. 308.
11. Спицнадель В.Н. Основы системного анализа: учеб. Пособие. — СПб.: Изд. дом Бизнес-пресса, 2000. с. 3–26.
12. Егорова Ю.А. Роль целеполагания в системе управления // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2010. № 9.
13. Бозций. Утешение философией // Бозций. Утешение философией и другие трактаты. Серия: Памятники философской мысли / пер. с лат. Г.Г. Майоров, Т.Ю. Богодай, В.И. Уколова, М.Н. Цейтлин / РАН: Ин-т филос. М.: Наука, 1996;
14. Платон. Государство / Пер. с греч. А.Н. Егунов // Платон. Сочинения в 4-х тт. Т. 3. Ч. 1. 2007.
15. Егорова Ю.А. Роль целеполагания в системе управления // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2010. № 9. С. 34–39.
16. Еремин С.В. Разграничение полномочий и ответственности в системе управления органов внутренних дел. Организационные и правовые вопросы. Автореферат дис. канд. юр. наук: 12.00.11/ Акад. упр. МВД РФ. — Москва, 2006. 25 с.

© Рыбак Александр Владимирович (rybak_2908@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АССОЦИАТИВНЫХ ПРАВИЛ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗНАНИЙ ИЗ ДАННЫХ СЕТЕВОГО ТРАФИКА В ЦЕЛЯХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ

RESEARCH ON THE EFFECTIVENESS OF ASSOCIATIVE RULES FOR EXTRACTING KNOWLEDGE FROM NETWORK TRAFFIC DATA FOR CYBERSECURITY PURPOSES

O. Sabinin
R. Turusov
R. Chuprina

Summary. This paper investigates the effectiveness of using associative rules in analyzing network traffic data to discover new knowledge that can be useful for cybersecurity purposes. Associative rules allow the discovery of hidden dependencies and patterns in data, which can carry information missed by other machine learning techniques. The paper presents key approaches and algorithms for generating associative rules, their advantages, and limitations. The results of an experimental study demonstrating the effectiveness of associative rules in analyzing network traffic are presented. The necessity of associative rules integration into traffic analysis systems is substantiated and directions for further research in this area are suggested.

Keywords: associative rules, knowledge extraction, traffic analysis, machine learning, data analysis, big data, network security, traffic optimization.

Сабинин Олег Юрьевич

Кандидат технических наук, доцент,
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
olegsabinin@mail.ru

Турусов Роман Андреевич

Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
turusov97@yandex.ru

Чуприна Роман Владимирович

Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
romanchuprina55@gmail.com

Аннотация. В данной статье проводится исследование эффективности использования ассоциативных правил при анализе данных сетевого трафика для выявления новых знаний, которые могут быть полезны для целей кибербезопасности. Ассоциативные правила позволяют обнаруживать скрытые зависимости и закономерности в данных, что может нести в себе информацию, упущенную при использовании других методов машинного обучения. В статье приводятся ключевые подходы и алгоритмы генерации ассоциативных правил, их преимущества и ограничения. Представлены результаты экспериментального исследования, демонстрирующие эффективность ассоциативных правил в анализе сетевого трафика. Обосновывается необходимость интеграции ассоциативных правил в системы анализа трафика и предлагаются направления для дальнейших исследований в этой области.

Ключевые слова: ассоциативные правила, извлечение знаний, анализ трафика, машинное обучение, анализ данных, большие данные, сетевая безопасность, оптимизация трафика.

Введение

Анализ сетевого трафика является одним из ключевых аспектов обеспечения кибербезопасности в современных информационных системах. В условиях постоянно растущего объема передаваемых данных и увеличения числа конечных пользователей, необходимость в эффективных методах анализа становится все более актуальной. Цель такого анализа — выявление аномалий в контролируемых параметрах сетевого трафика, обнаружение попыток несанкционированного доступа и предотвращение атак, что позволяет обеспечить защиту сетевой инфраструктуры и данных. Традиционно для анализа сетевого трафика используются методы

машинного обучения, направленные на классификацию и кластеризацию данных [7, с. 9].

Классификация в рамках анализа сетевого трафика используется для присвоения классов новым образцам данных на основе обучающего набора. Это позволяет выявлять аномалии, фишинг, вторжения и предсказывать атаки. Наиболее распространенными алгоритмами являются методы на основе деревьев решений, случайных лесов и метода опорных векторов (SVM), а также различные вариации нейронных сетей. Эти методы эффективны для определения типа трафика и обнаружения аномалий в реальном времени [14, с. 29].

Кластеризация применяется в рамках анализа сетевого трафика для группировки данных на основе их сходства. Алгоритмы кластеризации, такие как k-means, DBSCAN и иерархическая кластеризация, позволяют выявлять скрытые паттерны в сетевом трафике и могут быть использованы для сегментации сети и обнаружения аномальных кластеров данных, которые могут указывать на подозрительную активность [6, с. 25; 13, с. 52].

Анализ временных рядов используется для мониторинга изменений в сетевом трафике с течением времени. Такие методы, как ARIMA, Prophet и рекуррентные нейронные сети (RNN), позволяют предсказывать будущее поведение трафика и выявлять аномалии на основе временных зависимостей [2, с. 122].

Несмотря на безусловную эффективность вышеуказанных методов, они имеют свои ограничения. Одним из ключевых недостатков является потеря значительной части информации в процессе подготовки данных для классификации или кластеризации. Этот процесс включает фильтрацию, нормализацию и другие методы предобработки, которые могут привести к утрате полезных признаков, особенно тех, которые могут быть выявлены только в контексте других данных.

Здесь на помощь могут прийти ассоциативные правила, которые позволяют выявлять скрытые зависимости и закономерности. Ассоциативные правила, широко используемые в анализе потребительских корзин в ритейле, до сих пор мало применяются в контексте анализа сетевого трафика. Эти правила позволяют находить часто повторяющиеся комбинации атрибутов в данных и определять их взаимосвязи, что может быть особенно полезно для выявления сложных паттернов в сетевом трафике, которые не поддаются обнаружению методами классификации или кластеризации [3, с. 53; 8, с. 89].

Применение ассоциативных правил, как по отдельности, так и в совокупности с другими методами машинного обучения может значительно повысить качество анализа сетевого трафика, предоставляя дополнительные знания и улучшая обнаружение аномалий и угроз.

Задача исследования заключается в оценке эффективности ассоциативных правил для анализа данных сетевого трафика с целью выявления скрытых знаний, которые могут быть полезны для улучшения методов кибербезопасности и оптимизации сетевого трафика.

Теоретические основы ассоциативных правил

Ассоциативные правила выявляют зависимости между элементами данных в транзакциях. Транзакция представляет собой множество элементов, которые происходят одновременно. Теоретически, эти зависимости,

также называемые правилами, основываются на концепции ассоциаций, которые предполагают наличие связи между элементами данных. Сами правила формируются по понятной концепции, если происходит событие X, то с какой вероятностью произойдёт событие Y. Алгоритм позволяет предсказывать вероятность события при наличии другого связанного с ним события.

Для оценки полученных ассоциативных правил на практике чаще всего применяют три метрики, которые определяются, как поддержка или support, достоверность или же confidence и так называемый лифт или lift. Первая метрика, а именно поддержка определяет то, как часто набор элементов встречается в базе данных с транзакциями. Например, для правила если встречается элемент X, то встречается элемент Y, данная метрика будет математически рассчитана как отношение количества транзакция содержащих оба элемента X и Y одновременно, к общему количеству всех транзакций. Достоверность определяется как условная вероятность появления элемента Y, как последователями, при условии наличия предшественника X в одной транзакции. В общем виде данная метрика математически обосновывается как отношение числа транзакций, содержащих X и Y, к числу транзакций, содержащих только X. Лифт измеряет зависимость между элементами, показывая, насколько чаще элемент Y встречается при наличии элемента X по сравнению с его собственным случайным появлением. Лифт определяется как отношение достоверности к поддержке элемента Y.

На практике реализовано несколько алгоритмов, позволяющих генерировать ассоциативные правила, каждому из этих алгоритмов присущи свои особенности и математическое обоснование на этапе генерации частых наборов элементов, для последующего ассоциативного анализа.

Наиболее часто используемым алгоритмом является алгоритм Apriori, которые в своем аппарате генерации частых наборов элементов использует итеративных подход. На каждом шаге алгоритм формирует кандидатов путём объединения частых совокупностей из предыдущего шага и отсекает те, которые не удовлетворяют заданному уровню поддержки. Основываясь на теории вероятностей, Apriori предполагает, что все непустые подмножества частых совокупностей элементов также должны быть частыми. После нахождения таковых алгоритм генерирует ассоциативные правила путём деления поддержки объединённого набора на поддержку поднабора, что соответствует вычислению достоверности (confidence).

Алгоритм FP-Growth представляет собой инновационный подход к анализу транзакционных данных, основанный на использовании компактной древовидной

структуры данных — FP-деревя. Эта структура позволяет эффективно хранить информацию о транзакциях, избегая необходимости многократного сканирования исходных данных. FP-дерево аккумулирует в себе все необходимые сведения о транзакциях, что значительно сокращает временные затраты на поиск частых наборов элементов и повышает эффективность процесса обнаружения скрытых закономерностей в данных.

Процесс извлечения ассоциативных правил в FP-Growth включает в себя создание условных баз данных для каждого элемента и построение соответствующих условных FP-деревьев. Эти деревья содержат информацию о взаимосвязях между элементами. Алгоритм анализирует пути в условных FP-деревьях, генерируя ассоциативные правила и оценивая их значимость и достоверность по аналогии с алгоритмом Apriori, но с более высокой эффективностью.

Eclat, другой алгоритм интеллектуального анализа данных, предлагает альтернативный подход к представлению транзакционных данных. В отличие от традиционного горизонтального представления, где транзакции представлены списками элементов, Eclat использует вертикальное представление, в котором каждому элементу соответствует набор идентификаторов транзакций, содержащих этот элемент. Eclat находит пересечения между наборами транзакций различных элементов, выявляя элементы, которые часто встречаются вместе в транзакциях.

Например, если элемент А встречается в транзакциях {1, 2, 3}, а элемент В — в транзакциях {2, 3}, то их пересечение {2, 3} указывает на транзакции, содержащие оба элемента. Генерация ассоциативных правил в Eclat осуществляется путем вычисления показателей поддержки и достоверности для найденных частых наборов элементов, что аналогично подходу, используемому в других алгоритмах поиска ассоциативных правил [11, с. 10; 15].

Анализ работ по исследованию эффективности ассоциативных правил к задачам кибербезопасности

Исследования в области анализа данных, генерируемых различными сетями, показали, что существуют различные методы и приемы, используемые для повышения уровня сетевой безопасности.

В литературе [5, с. 9] предлагается подход на основе ассоциативных правил для обнаружения сетевых вторжений, который анализирует данные из различных источников журналов. Процесс включает такие этапы, как сбор и предварительная обработка данных, выявление часто встречающихся закономерностей с помощью алгоритма Apriori, генерация ассоциативных правил

и применение этих правил для обнаружения аномалий в режиме реального времени. Такой подход позволяет быстро обнаружить отклонения от нормального поведения системы, которые могут свидетельствовать о наличии кибератаки, и значительно повышает безопасность информационных систем.

На конференции ICCSIE было представлено исследование, посвященное использованию ассоциативных правил для обнаружения мошенничества в телекоммуникационных сетях [9, с. 11]. Предложенный подход заключается в анализе данных о звонках и транзакциях клиентов, моделировании ассоциативных правил с помощью методов машинного обучения, оценке корреляции между различными моделями поведения и использовании модели для автоматического обнаружения подозрительных моделей. Благодаря этому подходу поставщики услуг могут быстро реагировать на мошенническое поведение и предотвращать финансовые потери.

В исследовании [12] авторы собрали и проанализировали журналы атак из различных источников и применили алгоритмы, такие как FP-Growth, для выявления часто встречающихся паттернов. Результаты исследования помогают понять взаимосвязь между различными факторами, влияющими на успех атаки, и способствуют разработке более эффективных стратегий предотвращения инцидентов в будущем.

В работе [4] описывается применение ассоциативных правил для обнаружения мошенничества в банковской сфере. Предложенная методика предполагает анализ данных о транзакциях, выявление необычных шаблонов транзакций с помощью алгоритмов корреляционного анализа, оценку риска каждой транзакции в режиме реального времени и автоматизацию процесса обнаружения мошенничества. Такой подход может значительно повысить эффективность борьбы с финансовыми преступлениями и защитить интересы банков и их клиентов.

Приведенное выше исследование демонстрирует широкий спектр применения ассоциативных правил в области кибербезопасности и подчеркивает перспективы дальнейших исследований в этом направлении. Использование математических аппаратов ассоциативных правил открывает новые возможности для защиты информации и предотвращения киберугроз, а также способствует разработке более совершенных и надежных методов обеспечения безопасности в цифровой среде.

Методология использования ассоциативных правил для анализа сетевого трафика

Качество и подготовка данных играют ключевую роль в обеспечении точности и надежности результатов анализа сетевого трафика с использованием ассоциативных

правил. Прежде чем применять методы ассоциативного анализа, необходимо тщательно обработать данные.

Первым шагом является удаление всех пропущенных значений. Заполнение пропущенных значений допустимо в других методах анализа данных, но в анализе сетевого трафика этот метод может привести к искажению результатов из-за значительных вариаций значений параметров трафика. Поэтому очень важно удалить строки с пропущенными значениями.

Следующий шаг — удаление NaN (нечисловых) значений, которые могут возникнуть из-за ошибок при сборе или обработке данных. Наличие NaN-значений может серьезно повлиять на результаты анализа, снизив его точность и достоверность.

Тщательная предварительная обработка данных, включая удаление пропущенных и NaN-значений, является необходимым условием для получения надежных и достоверных результатов анализа сетевого трафика.

Следует также удалить дубликаты записей. В контексте кибербезопасности дублирующие записи могут быть полезны для обнаружения повторяющихся атак, однако в контексте ассоциативных правил дубликаты могут привести к искажению вероятностей и полученных правил.

После этого необходимо изучить данные и выбрать атрибуты, которые могут нести полезную информацию для построения ассоциативных правил. Важно провести экспертную оценку каждого атрибута с точки зрения его значимости и информативности. Оставшиеся после оценки атрибуты необходимо преобразовать в вид, пригодный для применения ассоциативных правил. Данные могут быть числовыми или категориальными.

Для категориальных атрибутов следует применить метод, который преобразует категориальные данные в бинарные признаки, создавая отдельные столбцы для каждого уникального значения атрибута. Для непрерывных данных проводится дискретизация, заменяя числовые значения на интервалы, представляющие собой определенные диапазоны. Это позволяет преобразовать непрерывные данные в категориальные. После этого все данные приводятся к виду транзакций, где каждая строка отображает наличие того или иного признака из изначальной таблицы.

На следующем этапе необходимо выбрать метод поиска ассоциативных правил. Применение метода Apriori, например, позволяет выявить часто повторяющиеся комбинации параметров. В процессе применения алгоритма Apriori необходимо выбрать минимальную степень поддержки для часто повторяющихся наборов данных. На их базе создаются ассоциативные правила, основанные на метрике уверенности или лифта. Полу-

ченные зависимости должны быть экспертно оценены с точки зрения их полезности для целей кибербезопасности. Важно проверить объективность и реалистичность выявленных правил, меняя метрики для достижения наилучшего результата. Таким образом, методология применения ассоциативных правил для анализа сетевого трафика включает в себя несколько этапов подготовки данных, построения правил и экспертной оценки.

Получение скрытых знаний из данных сетевого трафика

Набор анализируемых данных, использованный в данном исследовании, был получен из репозитория данных Mendeleey. Он включает в себя данные о сетевом трафике, собранные в среде программно-определяемой сети (SDN). Набор данных содержит различные атрибуты, описывающие характеристики сетевого потока, такие как IP-адреса источника и назначения, количество пакетов, количество байт, продолжительность сеанса, протокол и скорость трафика. Каждая строка представляет собой запись потока с 23 атрибутами в конце каждой строки (транзакции) имеется метка, которая показывает атака (A) это или же нормальное поведение (O).

Согласно вышеуказанной методологии из набора данных были удалены строки с пропущенными значениями и дубликатами, в целях обеспечения целостности данных и снижения ошибки в процессе расчета вероятностей. На следующем этапе в рамках экспертного анализа атрибутов в каждой транзакции был удален столбец времени вследствие низкой важности для ассоциативного анализа. При анализе столбца с атрибутом скорости передачи пакетов были отфильтрованы транзакции с отрицательным значением этого параметра.

Категориальные признаки, такие как источник, назначение, протокол были закодированы с помощью одноточечного кодирования. Этот процесс заключался в преобразовании категориальных переменных в двоичный формат, создавая новые столбцы для каждой уникальной категории. Этот шаг был необходим для подготовки данных к работе алгоритма Apriori, который требует двоичного ввода.

Для признаков с непрерывными числовыми значениями были подобраны пороговые значения, чтобы разделить их на три диапазона. Используемые пороговые значения были определены на основе знаний о предметной области и распределения данных. Для каждой характеристики были созданы три новых столбца, чтобы указать, является ли значение низким, средним или высоким, а исходные столбцы были удалены. Набор данных был преобразован в двоичный формат, где каждый столбец представляет собой наличие (1) или отсутствие (0) определенного признака.

Данные в двоичной кодировке были преобразованы в транзакционное представление с помощью библиотеки mlxtend на языке Python. Это представление представляет каждую строку как набор бинарных атрибутов, подходящих для поиска ассоциативных правил.

Основной целью данного исследования было применение алгоритма Apriori к предварительно обработанным данным сетевого трафика для обнаружения скрытых знаний, заключающихся в уверенных зависимостях и закономерностях между данными в транзакциях.

Для обнаружения частых наборов элементов в данных поддержка была установлена на 20 %. Затем из частых наборов были сгенерированы ассоциативные правила с минимальной уверенностью 60 %. Для фильтрации результатов были выбраны только те правила, у которых в качестве следствия стоял параметр атаки.

Для экспертной оценки полученных правил опорными параметрами для предшественников атаки были выбраны: высокий объем переданных байт, высокая скорость передачи, длительность сессии, высокое количество пакетов на поток, высокое общее количество пакетов. Согласно исследованиям [1, с. 209; 10; 16], данные параметры могут свидетельствовать о попытках утечки данных или об атаке типа DDoS, при которой злоумышленники стараются перегрузить сеть, могут быть признаком сканирования сети или массовой передачи данных, указывает на возможные устойчивые атаки, при которых злоумышленники пытаются поддерживать длительное соединение с целью сбора данных или дальнейшего проникновения.

В таблице 1 указаны элементы, предшествующие метки атаки (A), и полученные значения метрик.

Таблица 1.

Найденные зависимости в данных

Условие	Следствие	support	confidence	lift
высокий объем переданных байт, высокая скорость передачи, высокое количество пакетов на поток, высокое общее количество пакетов	A	0.2076	0.6353	1.67

Анализируя полученные зависимости между параметрами в транзакциях, можно сделать вывод о том, что с вероятностью в 63 % зафиксированным кибератакам предшествуют высокие значения передаваемого объема байт в совокупности с высоким значением скорости передачи данных и высоким количеством пакетов на поток

и общим количеством пакетов. В данном случае значение support в 21 % говорит о том, что данные параметры встречаются вместе в совокупности транзакций не так часто, что свидетельствует о том, что атаки — это редкие включения периодического характера. Данное значение lift, говорит о том, что совокупность данных параметров встречается на 67 % чаще в качестве предшественника атаки, нежели чем нормального поведения. Основным результатом этого практического исследования является выявление сильной зависимости между высокими значениями определенных сетевых характеристик и вероятностью сетевых атак.

При изменении значений поддержки и уверенности алгоритм способен выявлять новые устойчивые зависимости, включающие различные наборы предшественников и последователей.

Выводы и рекомендации

В процессе приведенного выше исследования проведен анализ эффективности работы ассоциативных правил в рамках обработки данных сетевого трафика с целью нахождения новых знаний, полезных для целей кибербезопасности. Для эффективной работы с данным математическим аппаратом были описаны теоретические основы алгоритмов, входящих в математическую область ассоциативных правил, представлена методология подготовки данных к применению этих методов и шаги по интерпретации полученных результатов с помощью особых метрик.

На основе проведенного практического анализ можно сделать вывод о том, что применение ассоциативных правил для анализа данных сетевого трафика является эффективным мероприятием. В рамках исследования были получены устойчивые зависимости между сетевыми характеристиками и вероятностью возникновения атаки. Данные зависимости или же знания могут служить отправной точкой в исследованиях по совершенствованию систем мониторинга сетевого трафика.

На основе проведенного исследования рекомендуется интегрировать ассоциативные правила с методами машинного обучения, такими как кластеризация и классификация, для более точного предсказания аномалий в сетевом трафике. Также следует обратить внимание на сбор более детализированных и разнообразных данных о сетевом трафике, что позволит улучшить качество анализа и выявления закономерностей. Наконец, рекомендуется регулярно обновлять и адаптировать модели ассоциативных правил в соответствии с изменяющимися условиями сетевого окружения и новыми типами угроз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Aleroud A., & Karabatis G. (2018). Queryable Semantics to Detect Cyber-Attacks: A Flow-Based Detection Approach. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 48, 207–223. DOI: 10.1109/TSMC.2016.2600405
2. Bian K. et al. (2021). Characterizing Network Traffic Behavior Using Clustering Techniques. *IEEE Communications Magazine*, 59, 120–126. DOI: 10.1109/MCOM.001.2000987
3. Feng X. et al. (2022). FAFS: Fuzzy Association Feature Selection Method for Network Intrusion Detection. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 30, 50–60. DOI: 10.1109/TFUZZ.2021.3059598
4. InfoSec Writeups (2021). Association Rule Mining for Cybersecurity. InfoSec Writeups.
5. Kim H. et al. (2022). Effective Association Rule Mining for Cybersecurity. *Proceedings of the 2022 ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 24, 1–10. DOI: 10.1145/3558819.3558820
6. Kim J. et al. (2018). Multivariate Network Traffic Analysis Using Clustered Data. *Computer Networks*, 144, 19–30. DOI: 10.1016/j.comnet.2018.07.011
7. Kotenko I. et al. (2020). Machine learning and data processing for cybersecurity data. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 50, 1–11. DOI: 10.1109/TSMC.2020.2968487
8. Kumar V. et al. (2006). *Theoretical Foundations of Association Rules*. Springer, 5, 80–100. DOI: 10.1007/978-3-540-30142-4_5
9. Lee J. et al. (2020). Network Traffic Analysis Using Association Rule Mining. *Sensors*, 20, 1–12. DOI: 10.3390/s20123456
10. Oh C., Lee S., Xu W., Vora R., & Kim T. (2022). Mitigating Low-volume DoS Attacks with Data-driven Resource Accounting. *ArXiv*, abs/2205.00056. DOI: 10.48550/arXiv.2205.00056
11. Srikant R., & Agrawal R. (1996). Mining Quantitative Association Rules in Large Relational Tables. *Proceedings of the 1996 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*, 26, 1–12. DOI: 10.1145/347090.347101
12. TechTarget. Association rules in data mining [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.techtarget.com/whatis/definition/association-rules-in-data-mining>, свободный. — Загл. с экрана. — Дата обращения: 03.09.2024.
13. Wang L. et al. (2019). Clustering Analysis of Network Traffic Data. *IEEE Access*, 7, 150125–150135. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2946967
14. Yong C. et al. (2018). Improved Cluster Analysis Algorithm Using Network Data. *Journal of Network and Computer Applications*, 94, 30–40. DOI: 10.1016/j.jnca.2017.06.013
15. Zhang J. et al. (2020). Cyber Intrusion Detection through Association Rule Mining on Multi-Source Logs. *IEEE Access*, 8, 180021–180033. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3020475
16. Zhou L., Liao M., Yuan C., & Zhang H. (2017). Low-Rate DDoS Attack Detection Using Expectation of Packet Size. *Secur. Commun. Networks*, 2017, 3691629:1–3691629:14. DOI: 10.1155/2017/3691629

© Сабинин Олег Юрьевич (olegsabinin@mail.ru); Турусов Роман Андреевич (turusov97@yandex.ru);
Чуприна Роман Владимирович (romanchuprina55@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

СОЗДАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ТЭЦ

CREATION OF AN INFORMATION SYSTEM FOR CONTROL AND MONITORING OF THE CONDITION OF CHPP EQUIPMENT

Fang Jiwen
Wang Guyue
Wang Zedong
Zou Lingyu

Summary. The article is devoted to the consideration of topical issues related to the provision of effective monitoring and maintenance of CHPP equipment based on modern technologies that allow for remote control. The article proposes the author's approach to building an information system for controlling and monitoring the state of CHPP equipment, which relies on the industrial Internet of Things systems, wireless communication technologies and intelligent data analysis. Special attention is paid to the main blocks of the information system and the possibilities of using digital twins to ensure continuous online monitoring.

Keywords: equipment, cogeneration plant, control, data transfer, information system.

Фан Цзивэнь

Специалист, Отдел по ремонту,
ООО «Хуадянь-Тенинская ТЭЦ»
313008248@qq.com

Ван Гуюе

Специалист, Производственно-технический отдел,
ООО «Хуадянь-Тенинская ТЭЦ»
635396905@qq.com

Ван Цзэдун

Инженер, ООО Государственная
научно-техническая компания энергетики
635396905@qq.com

Цзоу Линьюй

Преподаватель, Хэйлунцзянский университет
313008248@qq.com

Аннотация. Статья посвящена рассмотрению актуальных вопросов, связанных с обеспечением эффективного мониторинга и обслуживания оборудования ТЭЦ на базе современных технологий, позволяющих обеспечить удаленный контроль. В статье предложен авторский подход к построению информационной системы для контроля и мониторинга состояния оборудования ТЭЦ, который опирается на системы промышленного Интернета вещей, беспроводные технологии связи и интеллектуальный анализ данных. Отдельно описаны основные блоки информационной системы и возможности использования цифровых двойников для обеспечения непрерывного мониторинга оборудования ТЭЦ в режиме реального времени.

Ключевые слова: оборудование, ТЭЦ, контроль, передача данных, информационная система.

Энергия является одним из основных факторов развития любой страны. Из-за быстрого роста урбанизации спрос на нее растет с каждым днем. Растущие потребности в электроэнергии оказывают давление на ТЭЦ по всему миру, что приводит к необходимости внедрения новых технологий их технического обслуживания и наблюдения [1]. В 2020 году мировой рынок ТЭЦ оценивался в \$1345 млрд. Сегодня прогнозируется, что к 2030 году он достигнет \$1821 млрд, а среднегодовой темп роста составит 3,2 % с 2021 по 2030 год. Эти установки используются для преобразования тепловой энергии в электрическую для жилых и коммерческих помещений.

В свете вышеизложенного не подлежит сомнению тот факт, что ТЭЦ нуждаются в сложных системах автоматического управления, которые позволят соблюдать критерии экологичности и эффективности с учетом различного качества топлива. Турбины, котлы и генераторы должны работать безотказно и надежно, соблюдение этих требований критически важно на потенциально опасных этапах запуска и работы с невысокой нагрузкой. Помимо

этого, значимыми являются задачи оптимизации процесса сжигания топлива, очистки дымовых газов и безопасного введения в работу генераторов и турбин [2].

Основу комплекса автоматического управления ТЭЦ составляют информационные системы. Передовые цифровые технологии, такие как Интернет вещей (IoT), контрольно-измерительный комплекс (SCADA) и облачные вычисления, уже используются в ограниченном объеме для отслеживания параметров электростанций. Эти технологии позволяют организовать системы сбора данных для мониторинга и контроля определенных событий, в том числе для оценки степени износа и разработки программ технического обслуживания конкретных устройств и оборудования. Полученные данные собираются для дальнейшего анализа интеллектуальным устройством обработки, таким как концентратор данных или сервер. В результате специальные программные приложения для систем сбора данных дают возможность быстро выявлять несвоевременные неисправности, а также устранять их [3].

В тоже время необходимо отметить, что создание информационной системы для мониторинга и контроля работы ТЭЦ является нетривиальной задачей, поскольку она должна отвечать различным требованиям: (1) работа с гетерогенностью, поскольку задействованы различные технические платформы; (2) использование устройств с ограниченными ресурсами, таких как интеллектуальные датчики; (3) приложения, требующие спонтанного взаимодействия; (4) сверхкрупные сети и большое количество событий; (5) требования к динамическому поведению сети; (6) приложения, учитывающие контекст и тип оборудования (7) необходимость распределенного интеллекта.

Таким образом, вопросы проектирования проблемно-специфичных информационных систем, реализующих различные протоколы отслеживания состояния оборудования ТЭЦ составляют на сегодняшний день актуальную научно-практическую задачу, которая и обусловила выбор темы данной статьи.

Перспективы реализации онлайн-мониторинга работы ТЭЦ на основе систем SCADA, которые позволяют оценивать текущее состояние устройств и определять точки возникновения неисправностей, рассматривают в своих трудах Михайлов В.Е., Смолкин Ю.В., Сухорук Ю.Г., Ильина О.В., Каев Д.С., Subhasis Panda, Sarthak Mohanty, Pravat Kumar Rout, Binod Kumar Sahu.

Особенности использования инструментов облачных вычислений для создания системы мониторинга электростанций нашли свое отражение в публикациях Теличенко Д.А., Боголей Е.В., Колотова И.А., Долгушева А.Н., Агибалова В.А., Щербатова И.А., Sambeet Mishra, Chiara Bordin, Qiuwei Wu.

Схемы датчиков, необходимые для измерения абсолютных значений работы оборудования ТЭЦ, параметры передачи собранных данных через USB на ПК для их дальнейшей обработки и анализа описывают Чугин А.В., Бабкин К.В., Сиротенко Е.В., Никифоров И.С., Justin Jose, Anirudh Agarwal, Vimal Bhatia, Ondrej Krejcar.

Имеющиеся на сегодняшний день публикации и разработки, несомненно, внесли значительный вклад в изучение и раскрытие рассматриваемой проблематики. Однако в контексте стремительных темпов цифровизации и возрастающих экологических требований к работе ТЭЦ, ряд вопросов организации мониторинга состояния оборудования остается открытым. Так, отдельного внимания заслуживают задачи разработки и использования интегрированного решения для обслуживания и удаленного мониторинга ТЭЦ, которое будет включать улучшенные пользовательские интерфейсы, а также позволит обеспечить объединение функций управления и удаленного мониторинга в единую систему. Не-

решенной остается проблема создания экономически эффективной системы сбора данных, которая могла бы непрерывно показывать показатели производительности и сигнализировать о необходимости технического обслуживания оборудования.

Таким образом, цель статьи заключается в рассмотрении подходов к созданию информационной системы, которая будет позволять проводить контроль и мониторинг состояния оборудования ТЭЦ.

Итак, на первом этапе исследования формализуем требования к информационной системе. Система, обеспечивающая и поддерживающая соблюдение основных требований к мониторингу и управлению оборудованием ТЭЦ, должна удовлетворять следующим условиям:

1. Отслеживание в режиме реального времени ключевых параметров работы оборудования и станции в целом.
2. Наличие надежной беспроводной связи для контролируемых установок.
3. Накопление и хранение архивов показателей контролируемых параметров и журналов событий, связанных с запуском, остановкой и неисправностями оборудования.
4. Выполнение основных команд (остановка или запуск систем и установок).
5. Обеспечение обратной связи при выполнении команд, подаваемых компьютером или генерируемых станцией.

С учетом отмеченных требований на рис. 1 представлен общий контур информационной системы. Датчики, счетчики и PMU (Phaser Measurement Units) используются в различных местах ТЭЦ на различном оборудовании для измерения широкого спектра электрических данных, таких как напряжение, ток, частота, коэффициент мощности и фазовые углы. В свою очередь полевые контроллеры, такие как программируемые логические контроллеры (PLC), интеллектуальные электронные устройства (IED) или удаленные терминальные блоки (RTU), подключаются к этим измерительным приборам для передачи данных на сервер, где информация собирается и группируется с целью проведения дальнейшего анализа.

Цифровые данные, полученные от полевых устройств, передаются на главный терминальный блок, расположенный в удаленном месте. Удаленный мониторинг работы оборудования станции реализуется через специальные защищенные линии виртуальной частной сети (VPN) или с помощью глобальной вычислительной сети (WAN) для создания сетей «точка-точка». Однако управление и изменение параметров осуществляются исключительно локально на месте в специально отведенных для этого диспетчерских пунктах операторами.



Рис. 1. Общий контур информационной системы для мониторинга работы ТЭЦ

Главный терминальный блок определяет заданные значения работы оборудования на основе диапазонов параметров и посылает сигналы обратно к компонентам на местах для принятия необходимых мер, чтобы избежать сбоев и оптимизировать работу установок.

Далее рассмотрим более детально прикладной, аппаратный уровень предложенной информационной системы.

Что касается исполнительного компонента системы, то эффективная инфраструктура, состоящая из промышленных устройств для сбора данных и управления, может быть сконфигурирована с помощью специализированного блока, например, такого как блок PC-05/104 Process Control. Полученные данные передаются в концентратор, который имеет возможность принимать основные показатели работы оборудования как напрямую, так и путем подключения к специальным

измерительным блокам. Промышленная система PC-06/104 Process Control наилучшим образом отвечает этим запросам и задачам, помимо этого она может обеспечивать последовательную передачу информации на более высокий иерархический уровень для формирования архивов [4].

Принимая во внимание тот факт, что наиболее универсальным средством удаленной связи является беспроводная связь, поддержку GSM предлагаем осуществлять с помощью производительных модемов, которые лучше всего подходят для промышленных условий. Устройства IFB-122 представляют собой интеллектуальные структуры, оснащенные GSM-модемом и работающие под управлением операционной системы Linux, обеспечивающей эти функции.

В таблице 1 представлено краткое описание обозначенных выше блоков и устройств.

Таблица 1.

Основные блоки информационной системы для контроля и мониторинга состояния оборудования ТЭЦ

Блок	Функции
Блок защиты (PC-05/104)	Контролирует токи и напряжения в установках, реализует несколько функций защиты, таких как защита от максимального тока, защита от перегрузки и гомополярная защита. Он также передает полученные данные в блок концентратора данных.

Блок	Функции
Блок концентратора данных (PC-06/104)	Позволяет получать аналоговые значения как последовательно, так и через аналоговые входы, а также обеспечивает цифровой мониторинг сигналов станции, имеющих критическое значение. Также этот блок собирает данные со всех других устройств в структуре контроля и управления, включая температурные адаптеры и датчики скорости вращения. Полученные данные последовательно передаются по запросу на командный блок с помощью GSM-модемов, обеспечивающих беспроводную связь.
GSM-структуры (IFB-122)	Центральные процессоры со встроенным GSM-модемом, обеспечивающим последовательную связь с концентратором данных и GSM-связь с другим GSM-терминалом, который последовательно передает данные на командный блок. Оба GSM-терминала являются промышленными устройствами, работающими в расширенном температурном диапазоне -40-85 °С.
Командный блок	Любое промышленное устройство или система с Windows-совместимой операционной системой, позволяющей запускать специальные программные приложения. Он может быть сконфигурирован как блок управления для координации обновления данных и инициирования команд запуска, выключения, увеличения и уменьшения производительности. В состав контролируемой структуры входит ноутбук для выполнения этой задачи.

Учитывая сложность неисправностей, которые могут возникать в работе оборудования ТЭЦ, а также ее огромное влияние на промышленный и общественный сектор, становится все более важным сократить время отклика

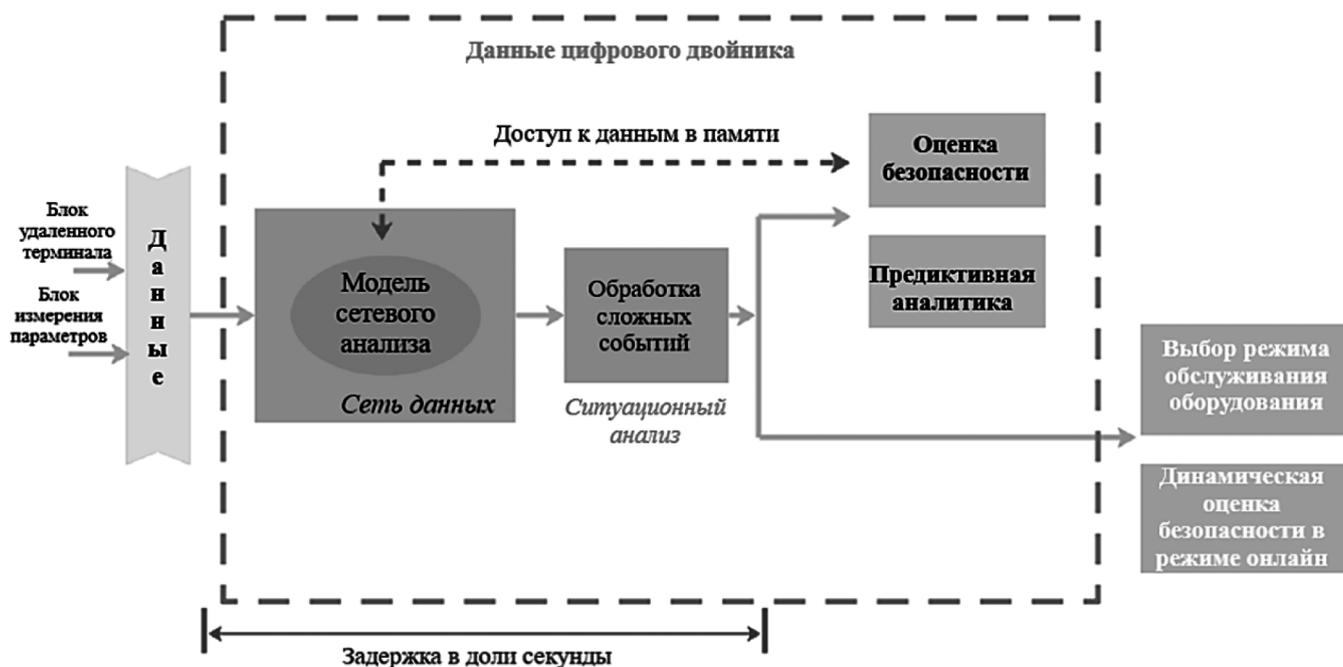


Рис. 2. Архитектура системы онлайн-анализа оборудования ТЭЦ в реальном времени в сочетании с цифровым двойником

всей информационной системы, чтобы лучше отслеживать и заблаговременно предупреждать обслуживающий персонал о возникающих неисправностях. С этой целью могут быть использованы методы онлайн-анализа на основе вычислений в памяти и двойных нейронных сетей [5]. Также, по мнению автора, перспективным решением является внедрение фреймворков цифрового двойника в прикладную среду онлайн-анализа работы ТЭЦ.

На рис. 2 представлен пример среды онлайн-анализа работы ТЭЦ с использованием данных цифрового двойника.

Архитектура онлайн-анализа с цифровым двойником предполагает использование ряда мощных встроенных функций, включая вычисления в памяти, высокопроизводительные параллельные вычисления, обработку сложных событий и машинное обучение. Как показано

на рис. 2, после передачи информации об измерениях в режиме онлайн с блока удаленного терминала на шину данных диспетчерского пульта, модель сетевого анализа непрерывно обновляется с субсекундной задержкой для отслеживания рабочего состояния оборудования. При обнаружении критической ситуации данные посылаются на пульт управления для принятия решения обслуживающим персоналом.

Таким образом, в статье представлен авторский подход к построению информационной системы для контроля и мониторинга состояния оборудования ТЭЦ, который опирается на системы промышленного Интернета вещей, беспроводные технологии связи и интеллектуальный анализ данных. Предполагается, что использование предложенной системы на практике позволит обеспечить предиктивное обслуживание оборудования ТЭЦ и эффективный контроль за работой станции в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Разумов Р.В., Соловьев М.Ю., Михайлов А.В. Системы мониторинга высоковольтного энергетического оборудования: мониторинг частичных разрядов во вращающихся электрических машинах // Релейная защита и автоматизация. 2021. № 1 (42). С. 46–59.
2. Теличенко Д.А., Боголей Е.В., Колотов И.А. Информационная система для контроля наработки и состояния оборудования ТЭЦ // Ученые заметки ТОГУ. 2022. Т. 13. № 2. С. 44–61.
3. Diaa-Eldin A. Mansour, Mohamed Numair Applications of IoT and digital twin in electrical power systems: A comprehensive survey // IET Generation, Transmission & Distribution. 2023. Volume 17, Issue 20.
4. Krishna Pandey Linear pricing game-based power control with resource allocation and interference management in device-to-device communication for IoT applications // Expert Systems. 2022. Volume 40, Issue 5. P. 13–19.
5. Lei Li, Hanjun Ma Thermal Power Plant Turbine Rotor Digital Twin Automation Construction and Monitoring System // Mathematical Problems in Engineering. 2022. Volume 2022, Issue 1. P. 76–82.

© Фан Цзивэнь (313008248@qq.com); Ван Гуюе (635396905@qq.com); Ван Цзэдун (635396905@qq.com); Цзоу Линюй (313008248@qq.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ПРОЦЕССАХ ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGY IN MANAGEMENT DECISION-MAKING PROCESSES

E. Khakov

Summary. Improving the efficiency of managerial decision-making is becoming one of the most urgent tasks in the field of modern management. The quality of preparation, decision-making and implementation determines the overall effectiveness of various enterprises and organizations. Artificial intelligence technologies play a special role in these issues in the context of modern technological progress. The main purpose of this work is to perform an analysis regarding the application of artificial intelligence technologies in management decision-making processes. The author reflects the main capabilities of these technologies and systematizes the main technological solutions, the use of which will significantly improve the quality and effectiveness of decisions made. The results of the research can be used in the design and development of decision-making tools, reflecting key methods and technologies depending on the management subtasks being solved. The author also focuses on the possibility of integrating artificial intelligence as a module into ready-made analysis systems. The technical features of the implementation and the features of using intelligent technologies to provide various scenarios to the expert for decision-making are revealed. The materials of the work confirm the high level of relevance and wide possibilities of using intelligent technologies in management decision-making processes.

Keywords: Artificial intelligence, decision-making, management, management decisions, automation, analysis systems.

Хаков Евгений Маратович

*Аспирант, Российская Академия Народного Хозяйства
и Государственной Службы
при Президенте Российской Федерации, г. Москва
evgenyhakov@yandex.ru*

Аннотация. Повышение эффективности принятия управленческих решений становится одной из наиболее актуальных задач в сфере современного менеджмента. Именно от качества подготовки, принятия и реализации решений зависит общая эффективность в деятельности тех или иных предприятий и организаций. Особенную роль в данных вопросах в условиях современного технологического прогресса занимают технологии искусственного интеллекта. Основной целью настоящей работы является выполнение анализа относительно применения технологий искусственного интеллекта в процессах принятия управленческих решений. Автором отражены основные возможности данных технологий и систематизированы основные технологические решения, использование которых позволит существенно повысить качество и эффективность принимаемых решений. Результаты исследования могут быть использованы в проектировании и разработке инструментов принятия решений, отражая ключевые методы и технологии в зависимости от решаемых подзадач менеджмента. Автором также акцентируется внимание на возможности интеграции искусственного интеллекта в качестве модуля в уже готовые системы анализа. Раскрываются технические особенности реализации и особенности использования интеллектуальных технологий для предоставления различных сценариев эксперту для принятия решений. Материалы работы подтверждают высокий уровень актуальности и широкие возможности применения интеллектуальных технологий в процессах принятия управленческих решений.

Ключевые слова: искусственный интеллект, принятие решений, менеджмент, управленческие решения, автоматизация, системы анализа.

Введение

В 2024 году отмечается существенное повышение сложности проблем и непрерывный рост объема используемой информации в организациях и предприятиях. Принятие решений в современных условиях сталкивается с прямой потребностью в системах поддержки принятия решений (далее — СППР), основанных на современных инновационных технологиях. При этом одной из таких технологий является искусственный интеллект (далее — ИИ). Внедрение искусственного интеллекта как средства улучшения было опробовано в нескольких секторах в период с 2010-х годов по настоящий момент времени [1]. Однако только в 2023–2024 гг. стало очевидно, что ИИ не только можно, но и нужно использовать для улучшения процесса принятия решений. В частности, внедрение технологий ИИ может дать ме-

неджерам возможность принимать более эффективные решения, повышающие эффективность производства.

Широкое распространение и, как следствие, существенные положительные результаты и возможности повышения эффективности принятия управленческих решений подтверждаются размерами рынка интеллектуальных технологий и СППР на основе ИИ, в частности. Так, в 2023 году совокупный объем рынка ИИ-решений превысил 150 миллиардов долларов. Ожидается, что в ближайшее время к 2027 году объем рынка превысит 400 миллиардов долларов со средним темпом роста в 37,3 %. В рамках настоящего исследования подтверждается актуальность и рассматриваются возможности применения ИИ в процессах принятия управленческих решений. Представленные результаты могут быть использованы для актуализации необходимости примене-

ния ИИ в организациях, а также проектировании индивидуальных интеллектуальных СППР.

Результаты и обсуждение

Развитие и применение искусственного интеллекта в процессах принятия управленческих решений становится все более актуальным в 2024 году. В условиях стремительно увеличивающихся объемов данных и усложняющихся бизнес-процессов, ИИ предоставляет возможность для более быстрого и точного анализа информации. Это позволяет менеджерам принимать обоснованные решения на основе данных, повышая эффективность управления и снижая риски [2]. Использование ИИ также способствует автоматизации рутинных задач, освобождая время для стратегического планирования и улучшая гибкость и адаптивность организаций в условиях быстро меняющейся внешней среды. Кроме того, ИИ открывает новые возможности для прогнозирования и моделирования различных сценариев, что помогает руководителям принимать решения с учетом будущих тенденций и возможных изменений. Внедрение ИИ в управленческие процессы способствует повышению конкурентоспособности компаний, снижению операционных издержек и улучшению качества решений, что делает его важным инструментом современного менеджмента.

Искусственный интеллект представляет собой широкий пласт технологий, методов и решений, которые могут значительно повысить эффективность процессов принятия управленческих решений. ИИ способен анализировать большие объемы данных, выявлять скрытые закономерности и предсказывать исходы различных сценариев, что делает его мощным инструментом в руках управленцев [3]. В управленческих процессах ИИ может быть использован для оптимизации ресурсов, прогнозирования спроса, оценки рисков, а также для принятия стратегических решений на основе данных. Основной сложностью является широкое разнообразие ИИ-средств и, как следствие, затруднение при выборе тех или иных решений и технологий.

В связи с этим, автором настоящей статьи проведена работа по систематизации основных ИИ-средств, использование которых возможно в разработке современных СППР для анализа и принятия управленческих решений (табл. 1).

Данная таблица может быть использована в проектировании и разработке ИИ-инструментов для поддержки принятия управленческих решений, поскольку она структурирует ключевые методы и технологии ИИ в зависимости от конкретных подзадач менеджмента [4]. Каждый метод или технология в таблице описаны с точки зрения их возможностей, функциональности

и применения в процессах управления, что позволяет четко определить, какие инструменты ИИ наилучшим образом подходят для решения определенных задач. Так, например, методы машинного обучения могут быть эффективно использованы для анализа больших данных и прогнозирования будущих бизнес-сценариев, что полезно для стратегического планирования и управления рисками. Технологии, такие как RPA, могут быть применены для автоматизации рутинных операций, что освобождает ресурсы для более важных управленческих задач. Так, таблица не только систематизирует подходы к ИИ, но и помогает выбрать наиболее релевантные решения для конкретных задач менеджмента, от анализа данных до автоматизации процессов, что способствует созданию более эффективных и гибких СППР. Основной упор в данном случае направлен на разработку и создание ИИ-модулей для дальнейшей интеграции в уже готовые системы принятия управленческих решений.

Интеграция искусственного интеллекта в качестве модуля в существующие системы анализа может быть реализована через добавление специализированных алгоритмов и моделей машинного обучения, которые обрабатывают данные совместно с традиционными аналитическими инструментами [5]. ИИ-модуль, будучи встроенным в систему, взаимодействует с основным функционалом, получая доступ к данным и анализируя их с использованием методов, таких как прогнозирование, классификация или кластеризация. Он может быть нацелен на улучшение точности анализа или автоматизацию части рутинных процессов, например сортировки или очистки данных. После внедрения ИИ может работать в режиме реального времени, обновляя прогнозы и рекомендации по мере поступления новых данных, что делает систему более динамичной и адаптируемой к изменениям. При этом ИИ не заменяет существующие функции системы, а дополняет их, используя исторические данные для обучения и последующего улучшения аналитических процессов. Например, система может предложить пользователю более точные прогнозы или автоматизировать выявление аномалий и трендов, основываясь на сложных взаимосвязях, которые сложно обнаружить обычными средствами.

Процесс работы интеграции ИИ в качестве модуля включает в себя обработку исходных данных, обучение моделей на исторических данных, а затем использование этих моделей для получения новых аналитических выводов и предложений. Модуль ИИ может действовать как независимый компонент системы или тесно взаимодействовать с другими её частями, обеспечивая более глубокий анализ и поддерживая принятие управленческих решений на основе данных [6]. Вместе с этим интеграция искусственного интеллекта в качестве модуля в уже существующие системы анализа открывает значительные возможности для повышения эффективности и точности

Таблица 1.

Технологические решения ИИ для задач принятия управленческих решений

№	Название	Описание	Что делает	Использование
Методы ИИ				
1	Машинное обучение (ML)	Машинное обучение представляет собой метод, при котором ИИ обучается на исторических данных и выявляет закономерности, которые можно использовать для предсказания будущих событий	Обученные модели могут предсказывать результаты на основе новых данных, повышая точность прогнозирования и предлагая наилучшие варианты действий	Может использоваться для предсказания рыночных тенденций, оценки рисков проектов, оптимизации логистических процессов или прогнозирования продаж, что помогает управленцам принимать решения на основе точных прогнозов
2	Обработка естественного языка (NLP)	Метод, позволяющий ИИ анализировать и обрабатывать текстовую информацию, преобразовывая ее в структурированные данные	NLP может анализировать документы, электронные письма, отзывы клиентов и другие текстовые источники, выявляя ключевые темы и настроения	Можно применять для анализа текстов корпоративных отчетов, юридических документов, обратной связи от клиентов или социальных сетей, что помогает руководителям лучше понимать общественное мнение и принимать решения на основе анализа текстовой информации
3	Глубокое обучение (DL)	Подвид машинного обучения, использующий нейронные сети с несколькими слоями для анализа сложных данных	Позволяет системе обучаться на огромных объемах данных и выполнять сложные задачи, такие как распознавание изображений, обработка аудиозаписей или предсказание сложных процессов	Может использоваться для анализа визуальных данных (например, фотографии производства или товаров), предсказания потребительского поведения, а также для оптимизации операционных процессов с помощью прогнозных моделей
Технологические решения ИИ				
1	Роботизированная автоматизация процессов (RPA)	Технология, которая позволяет автоматизировать повторяющиеся задачи с помощью программных роботов, имитирующих действия человека	Роботы могут выполнять рутинные задачи, такие как ввод данных, обработка транзакций или генерация отчетов, освобождая сотрудников для более творческих и стратегических задач	RPA можно интегрировать в СППР для автоматизации операций, таких как сбор данных, подготовка отчетов или выполнение стандартных бизнес-процессов, что ускоряет принятие решений и снижает операционные издержки
2	Интеллектуальные агенты	Это автономные программные системы, которые могут действовать самостоятельно, принимая решения на основе данных и заранее определенных правил	Могут собирать и обрабатывать информацию, выполнять задачи без вмешательства человека и взаимодействовать с другими системами	Могут собирать и анализировать данные из различных источников, прогнозировать сценарии развития событий и предлагать управленцам наиболее подходящие варианты решений на основе анализа данных в реальном времени
Интеграционные решения ИИ				
1	Интеграция ИИ с облачными технологиями	Облачные технологии предоставляют доступ к мощным вычислительным ресурсам и данным через интернет, что позволяет использовать ИИ на удаленных серверах без необходимости дорогостоящих локальных инфраструктур	Облачные ИИ-решения обеспечивают гибкость и масштабируемость, давая возможность обрабатывать огромные объемы данных и анализировать их в режиме реального времени	позволяют создавать гибкие СППР, которые могут оперативно обрабатывать данные и предоставлять актуальные прогнозы и рекомендации для управленцев на любом уровне и в любой точке мира
2	Интерфейсы для анализа данных в реальном времени	Интерфейсы реального времени предоставляют управленцам доступ к данным и прогнозам в режиме онлайн, что позволяет быстрее реагировать на изменения в бизнесе или внешней среде	Предлагают интерактивные панели, визуализацию данных и мгновенную аналитику, что упрощает процесс принятия решений	Обеспечивают прозрачность процессов и помогают оперативно отслеживать ключевые показатели эффективности, позволяя быстро адаптироваться к изменениям и принимать более точные и эффективные решения

работы таких систем. Искусственный интеллект может стать мощным дополнением к традиционным аналитическим платформам, улучшая их функционал за счет автоматизации процессов обработки данных, прогнозирования и адаптации решений на основе изменений в данных в реальном времени. Так, автором выделяются следующие возможности при интеграции ИИ, как модуля, в процессах принятия управленческих решений:

1. Улучшение качества анализа. ИИ может анализировать большие объемы данных быстрее и точнее, чем традиционные системы, выявляя скрытые закономерности и аномалии, которые сложно обнаружить обычными методами [7]. Это особенно полезно в системах, где данные поступают в больших объемах и требуют оперативной обработки, например, в финансовом анализе или маркетинговых исследованиях;
2. Автоматизация и ускорение процессов. Модули ИИ могут автоматизировать рутинные задачи, такие как сбор данных, их предварительная обработка и сортировка, что значительно сокращает время, необходимое для анализа. В результате пользователи могут быстрее получать готовые отчеты и рекомендации, повышая скорость принятия решений;
3. Прогнозирование и моделирование. Встроенные модули ИИ могут добавлять в существующие системы возможности прогнозирования на основе исторических данных. Это позволяет строить более точные модели поведения рынка, спроса, доходности или эффективности бизнес-процессов. Прогнозные модели могут также адаптироваться в реальном времени на основе новых данных, повышая точность аналитических выводов;
4. Адаптивные и обучаемые системы. ИИ-модули могут развиваться вместе с системой, обучаясь на новых данных и повышая свою эффективность. Это позволяет аналитическим платформам адаптироваться к меняющимся условиям и потребностям, например, учитывать новые рыночные тренды или изменения в поведении потребителей;
5. Персонализация аналитических отчетов. ИИ может анализировать предпочтения и запросы пользователей системы, формируя индивидуальные отчеты, которые фокусируются на наиболее важных для конкретного пользователя аспектах. Это снижает объем ненужной информации и позволяет сосредоточиться на ключевых данных.

Как видно, интеграция ИИ в готовые аналитические системы позволяет не только повысить их производительность, но и обеспечить более точное и адаптивное принятие решений, делая систему более интеллектуальной и эффективной в условиях постоянно меняющейся бизнес-среды. Однако, техническая реализация интеллектуальных технологий для предоставления экспер-

там различных сценариев принятия решений требует комплексного подхода, основанного на интеграции ИИ-модулей в существующие информационные системы [8]. Основной задачей этих модулей является анализ больших объемов данных и их преобразование в релевантные рекомендации и прогнозы. Модули ИИ, такие как машинное обучение, обработка естественного языка и глубинное обучение, могут быть встроены в систему для автоматической обработки данных, выявления закономерностей и формирования различных сценариев для оценки экспертом. Технические аспекты реализации включают настройку моделей ИИ для работы с конкретными бизнес-процессами или управленческими задачами. Для этого необходимо разрабатывать и обучать модели на базе исторических данных, адаптируя их к специфике организации или отрасли. Кроме того, ИИ должен быть способен быстро обрабатывать текущие данные и обновлять прогнозы, что требует высокой вычислительной мощности и наличия эффективных алгоритмов обработки информации. Важным элементом становится интеграция ИИ с системами реального времени, что позволяет предлагать актуальные сценарии и быстро реагировать на изменения в данных.

Использование ИИ-модулей позволяет предоставлять экспертам набор различных сценариев, каждый из которых может учитывать различные исходные данные и параметры. Например, машинное обучение может быть использовано для анализа и моделирования трендов, предлагая несколько вероятных вариантов развития событий. Эти сценарии могут включать в себя рекомендации, основанные на данных, прогнозы рисков или оценку экономических показателей. Важно, что ИИ способен предложить несколько альтернативных вариантов решений, каждый из которых учитывает разные наборы данных, что помогает экспертам принимать обоснованные и взвешенные решения. Помимо этого, ключевой особенностью ИИ-технологий является их способность обучаться и адаптироваться по мере получения новых данных. Это позволяет системе не только предлагать сценарии на основе исторической информации, но и учитывать актуальные изменения в реальном времени, автоматически корректируя предложения. Таким образом, интеллектуальные технологии дают возможность экспертам сосредоточиться на оценке и выборе лучших стратегий, в то время как ИИ берет на себя сложную задачу обработки данных и генерации обоснованных сценариев.

Заключение

Таким образом, основной целью представленной статьи являлось выполнение анализа относительно применения технологий искусственного интеллекта в процессах принятия управленческих решений. Автором отражены основные возможности интеллектуальных

технологий в управленческих процессах, а также систематизированы ключевые технологические решения, которые позволяют существенно повысить качество и эффективность принимаемых решений. Детально проанализированы различные методы искусственного интеллекта, такие как машинное обучение, обработка данных и прогнозирование, которые могут быть использованы для создания СППР в сфере менеджмента. Представленные результаты исследования могут найти практическое применение в проектировании и разработке решений, обеспечивая адаптацию технологий ИИ к различным управленческим задачам. Подробно показана взаимосвязь между конкретными методами ИИ и их возможным использованием для решения подзадач менеджмента, что подчеркивает практическую ценность исследования. Помимо этого, автором акцентировано внимание на возможностях интеграции ИИ в качестве модуля в существующие системы анализа. Описаны технические особенности такой интеграции, которые позволяют повысить точность и оперативность анализа

данных, а также возможности ИИ в предоставлении различных сценариев для экспертов, помогающих принимать обоснованные управленческие решения. Раскрыты важные аспекты, связанные с адаптивностью и обучаемостью ИИ, что делает системы более гибкими и эффективными в условиях динамично меняющихся данных.

В результате можно сделать вывод о том, что интеллектуальные технологии обладают огромным потенциалом для повышения эффективности процессов принятия управленческих решений. Их использование позволяет не только улучшить качество анализа, но и автоматизировать рутинные задачи, предоставлять экспертам несколько вариантов сценариев, основанных на комплексном анализе данных. Материалы работы подтверждают высокий уровень актуальности и широкие возможности применения интеллектуальных технологий в современных управленческих процессах, что делает их незаменимыми инструментами в повышении эффективности и точности принимаемых решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аббасов М.Ш. Применение искусственного интеллекта в системе поддержки принятия управленческих решений // Развитие теории и практики управления социальными и экономическими системами. 2022. №11. С. 85–89.
2. Тимохин М.Ю., Шаранин В.Ю. Искусственный интеллект и теория принятия решений: современные тенденции // ИВД. 2023. №10 (106). С. 33–39.
3. Ментюкова О.В. Искусственный интеллект в принятии решений // Агропромышленный комплекс: состояние, проблемы, перспективы: Сборник статей XVII Международной научно-практической конференции. 2022. С. 478–481.
4. Калашникова И.В., Несмеянов Д.В. Использование искусственного интеллекта при принятии управленческих решений в проектном менеджменте // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2023. №12–2 (87). С. 205–210.
5. Бамбуров В.А. Применение технологий искусственного интеллекта в корпоративном управлении // Государственная служба. 2018. №3 (113). С. 23–28.
6. Аникьева Э.Н., Кувардин С.Р. Искусственный интеллект для принятий решений // Наука и образование. 2022. №2. С. 209–214.
7. Ван Х. Применение искусственного интеллекта в принятии общественных решений и анализе политики // Миссия конфессий. 2023. №72. С. 130–134.
8. Абдулкадыров А.С., Дьяков В.Ф. Улучшение практики принятия управленческих решений в предпринимательстве на базе искусственного интеллекта // Журнал прикладных исследований. 2022. №6. С. 155–158.

© Хаков Евгений Маратович (evgenyhakov@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

АНАЛИЗ ДАННЫХ КАК ИНСТРУМЕНТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ

Хаков Евгений Маратович

Аспирант, Российская Академия Народного Хозяйства
и Государственной Службы
при Президенте Российской Федерации, г. Москва
evgenykhakov@yandex.ru

DATA ANALYSIS AS A TOOL FOR PROCESS IMPROVEMENT

E. Khakov

Summary. This article is devoted to the issues of expanding the use of data analysis to improve corporate processes. Within the framework of this study, the main principles and approaches to data analysis are considered, and ways to improve the methods already used by introducing artificial intelligence technology and using quantum computing are determined. The purpose of this work is to define the main tasks of analysis, methods for its implementation, and to identify ways to enhance analytical functions using end-to-end technologies. The author concludes that processes can be continuously improved by integrating new technologies and subsequently creating a synergistic effect between traditional management methods and intelligent analysis tools, providing the ability to quickly adapt to changes in the market environment due to the gradual transition from static to dynamic (executable) business processes.

Keywords: process improvement, data analytics, end-to-end technologies, big data, artificial intelligence, quantum communications.

Современные организации, оперирующие на мировом рынке информационных технологий, представляют собой сложную систему, огромный комплекс взаимосвязанных областей, в котором сосредоточено множество разнообразных видов деятельности, в значительной степени влияющих на экономику страны.

Формируя целевые параметры своего развития, гиганты отрасли добавляют, детализируют и стараются воплотить эти показатели в конкретных проектах цифровизации, модернизации, развития систем менеджмента качества, управления рисками, внутреннего контроля и многих других.

Обзор сложившихся и активно применяемых практик управления показывает, что лучшим способом связывать перечисленные задачи в единой основе является внедрение и расширение применения процессного подхода.

Методология процессного управления предполагает выстраивание процесса по жизненному циклу продукта или по управленческому циклу PDCA (Планирование —

Аннотация. Данная статья посвящена вопросам расширения применения анализа данных для совершенствования корпоративных процессов. В рамках настоящего исследования рассмотрены основные принципы и подходы к проведению анализа данных, а также определены способы улучшения уже применяемых методов за счет внедрения в них технологии искусственного интеллекта и использования квантовых вычислений. Целью данной работы является определение основных задач анализа, способов его проведения, а также обозначение путей усиления аналитических функций с помощью сквозных технологий. Автором делается вывод о непрерывном улучшении процессов за счет интеграции новых технологий и последующего создания синергетического эффекта между традиционными методами управления и инструментами интеллектуального анализа, обеспечивающими возможность быстро адаптироваться к изменениям в рыночной среде за счет постепенного перехода от статичных к динамичным (исполняемым) бизнес-процессам.

Ключевые слова: совершенствование процессов, анализ данных, сквозные технологии, большие данные, искусственный интеллект, квантовые коммуникации.

Действие — Проверка — Воздействие). Важно представлять цепочку процесса целиком и оценивать влияние всех входящих в него элементов, так как изменение даже одного из них может существенно повлиять на итоговый результат процесса — получаемый на выходе продукт. Важным инструментом комплексной оценки эффективности реализации процесса в таком случае становится анализ данных, в том числе интеллектуальный [4].

Возможность выполнения комплексного анализа подразумевает, что по каждому признаку необходимо иметь некоторый массив значений. Данные при этом становятся доступными либо как результат чьих-то натурных наблюдений, либо как сводка статистических отчетов. В силу этого обстоятельства, полученные исходные данные всегда требуют специальной предварительной обработки (подготовки), прежде чем их можно будет подвергнуть анализу.

Задача анализа данных состоит в том, чтобы:

1. Установить наличие имеющихся данных каких-либо общих скрытых закономерностей (паттернов);
2. Убедиться, что обнаруженная закономерность не является недостоверным результатом исследо-

вания, возникающим из-за дефектов метода исследования, а действительно существует в данных;

3. Понять, исходя из имеющихся знаний об объекте анализа, возможную причину возникновения паттерна;
4. Построить правдоподобную модель, описывающую выявленные закономерности.

Что касается цели анализа данных, то ее можно сформулировать следующим образом: уточнение или обогащение существующего знания об объекте анализа [3]. К основным способам такого обогащения относятся:

1. Порождение (вывод) новых понятий из данных, представляемых признаками объекта анализа (например, вычисление среднего значения ряда значений признака или кластеризация в пространстве признаков). Такой способ часто называют «агрегация» или «суммаризация»;
2. Обнаружение новых зависимостей (утверждений о связи признаков), подтвержденных данными (например, классификация для качественных признаков или регрессия для численных признаков). Такой способ обозначается термином «коррелирование».

При этом существующая в отрасли система аналитики устроена таким образом, что в большинстве случаев анализируются не сами процессы, а статистические показатели [2]. Поэтому самый простой вид анализа данных выражается в сопоставлении текущего значения показателя с каким-либо отчетным периодом либо же с его целевым значением. Риск такого подхода заключается в отсутствии возможности своевременного и взвешенного принятия корректирующих мер и воздействий.

Поэтому в случаях, когда речь идет об исполняемости и управляемости процессами, требуется прибегнуть к глубинному анализу процессов — технологии Process Mining. Она позволяет не только обеспечить более быстрый и точный анализ, но и оценить саму суть протекающих процессов, а не их модельные или обобщенные статистические представления. Данный подход позволяет перейти от констатации фактов о выполняемом процессе к выявлению причинно-следственных связей в самом механизме его реализации, определяя, почему процесс протекает именно таким образом [4].

Process Mining предполагает выполнение определенных шагов, позволяющих пройти путь от сбора данных до оптимизации процессов. В общем виде алгоритм проведения анализа по технологии Process Mining состоит из следующих этапов:

Обнаружение — фиксация операций в логах, а также сбор и консолидация данных;

Проверка соответствия — расчет характеристик и метрик, а также воссоздание реально протекающего процесса;

Улучшение — анализ и формирование выводов, а также проектирование и моделирование нового процесса;

Отслеживание — мониторинг корректности протекания обновленного процесса, а также контроль соответствия вмененных изменений целевому состоянию процесса.

Для проведения глубинного анализа процессов необходимы:

1. База моделей бизнес-процессов, которые будут способствовать определению взаимозависимостей исследуемых показателей в рамках единой процессной модели работы компании;
2. Наличие специализированных компьютерных программ, так как получение производных показателей из исходных данных невозможно посредством использования общепринятых офисных инструментов по причине их неадаптированности под работу с настолько большими информационными массивами;
3. Доступ к исходным источникам информации, а не к сводным статистическим отчетам для более корректного выстраивания причинно-следственных связей.

Анализ данных является базисом для обеспечения поэтапного перехода из исходного состояния организационных процессов в целевое, а его применение в качестве аналитического инструмента охватывает самые разные области и сегменты человеческой деятельности [4]. Подобные научно-технические направления, ориентированные на укрепление национальной экономики, прирост производственных мощностей и инновационное развитие, называются сквозными технологиями.

К ним, согласно Национальной технологической инициативе Российской Федерации, принято относить и технологии хранения и анализа больших данных (Big Data), в том числе с применением элементов искусственного интеллекта, а также квантовые технологии.

Искусственный интеллект (ИИ) сегодня — это не просто набор принципиально новых для мирового рынка технологий, а динамично развивающаяся область знаний, которая обещает трансформировать наше общество и экономику уже в ближайшие годы. По своей сути ИИ представляет собой набор программ и алгоритмов, главным отличительным свойством которых является способность обучаться, обобщать большой объем неструктурированной информации, а также выполнять

конкретные корректирующие действия без прямого вмешательства человека, что не только повышает эффективность реализации процесса за счет рационального математически выверенного использования имеющихся ресурсов (трудовых, финансовых, материальных и т.д.), но и позволяет переходить к предиктивной аналитике.

Интеллектуальный анализ данных в настоящее время находит активное применение в следующих сферах:

1. Прогнозирование — оценка потенциальных сценариев и расчет вероятности наступления определенных событий на основе отраслевых трендов и закономерностей в реализуемых процессах;
2. Классификация — разделение объектов на группы по характерным признакам для оптимизации информационных потоков компании;
3. Ассоциативный анализ — выявление взаимосвязей между различными переменными и оценка их влияния друг на друга;
4. Кластеризация — группировка объектов на основе схожести характеристик для выявления скрытых тенденций в данных.

Каждое из вышеперечисленных направлений акцентируется на принятие более обоснованных решений по процессам и закладывает основу для формирования искусственных разумных систем, которые на практике выражаются целым комплексом объединенных в единое целое интеллектуальных механизмов [2].

Хорошим примером подобного рода конфигураций могут служить интеллектуальные транспортные системы (ИТС), де-факто являющиеся совокупностью как аппаратных, так и программных решений, направленных на управление и оптимизацию транспортных потоков [3]. Они используют современные информационные технологии и результаты их вычислений для реализации ряда функций, таких как:

1. Управление дорожным движением: автоматизация светофоров и мониторинг загруженности дорог;
2. Информирование пользователей: предоставление актуальной информации о состоянии дорожной ситуации;
3. Оптимизация маршрутов: адаптация путей общественного транспорта и легковых автомобилей в зависимости от текущих условий и прогнозируемой ситуации на дорогах в заданном горизонте планирования.

Структурированная информация, получаемая из ИТС, не только улучшает качество транспортных услуг, но и способствует устойчивому развитию городской инфраструктуры, позволяя:

1. Сократить время в пути: благодаря адаптивному управлению светофорами и оптимизации маршрутов время ожидания уменьшается;

2. Увеличить безопасность: автоматизированные системы мониторинга помогают быстро реагировать на аварии и другие инциденты, накапливая при этом некоторую базу знаний и опыт, который в перспективе можно будет применить не только для ликвидации последствий аварии, но и для ее недопущения (например, более удачный вариант проектирования дорожных развязок);
3. Снизить экологическую нагрузку: оптимизация маршрутов и снижение пробок ведут к постепенному сокращению углеродного следа (уменьшение вредных выбросов).

Пути же расширения использования ИТС для совершенствования процессов за счет анализа данных в основном включают в себе те направления развития, которые на данный момент только начинают активно прорабатываться — например, интеграция ИТС с системами общественного транспорта, служб экстренной помощи и метеорологическими службами для обеспечения стандартизированного подхода к управлению движением [3]. Подобные объединенные аналитические платформы улучшат сам процесс сбора и обработки данных благодаря использованию датчиков и камер, ориентированных на комплексное отслеживание параметров, влияющих на движение (трафик, состояние дорог, наличие аварий, погодные условия), а также способствуют автоматизации управления транспортными потоками на основе анализа больших данных (создание в реальном времени исполняемых моделей движения и выявление на их основе наиболее проблемных участков за счет обновляемой нестатической информации).

Под большими данными понимаются огромные массивы неоднородной информации, которые могут как иметь, так и не иметь оформленную структуру, что нехарактерно для «классических» баз данных. В обобщенной трактовке «большие данные» являются социальным и экономическим феноменом, который связан с возникновением технологий анализа очень больших объемов информации в отдельных сферах и проявляющихся при этом сопутствующих (вытекающих) проблем [1]. Суть проблематики заключается не столько в создании громадных объемов данных, сколько в их структурном оформлении и выстраивании связей, что не соответствует общепринятому формату работы с информационными массивами. Одним из важнейших этапов работы с большими данными является очистка информации — процесс удаления ошибок и нерелевантной информации для повышения качества анализа и представления его результатов в максимально удобной для пользователя форме (информационная фильтрация).

Появление квантовых технологий может революционизировать подходы к обработке больших данных. Сам термин «квантовые технологии» относится к инноваци-

онным средствам, в которых применяются уникальные свойства квантовой механики — в первую очередь, квантовая запутанность. Квантовые компьютеры способны выполнять вычисления значительно быстрее, чем их классические аналоги, что открывает новые горизонты для улучшения моделей машинного обучения. Квантовые технологии могут повысить точность предсказаний за счет больших объемов проанализированной информации (в том числе — в реальном времени), а также заложить новые принципы хранения и интеграции данных из различных источников [1].

Если задать обычному компьютеру последовательность из тридцати 0 и 1, то на выходе мы получим миллиард возможных значений этой последовательности. Компьютер, использующий обычные биты, затратит на подобную обработку огромное количество времени, также использовав значительный ресурс своей памяти, ведь каждая комбинация будет пройдена им по отдельности. С другой стороны, квантовый компьютер обладает способностью «видеть» все миллиарды по-

следовательностей одновременно, что при выполнении аналогичной операции многократно разгрузит память устройства, обеспечив единовременный доступ к любой из интересующих нас комбинаций [2].

Таким образом, квантовые технологии могут существенно изменить ландшафт работы с данными, предоставляя новые инструменты для анализа и принятия решений в условиях растущих объемов информации.

Все вышеуказанное является объективными вызовами в современном мире, где нужно уметь не только оперативно реагировать на внешние и внутренние изменения, но и обеспечивать непрерывное развитие по всем направлениям своей деятельности, эффективно управляя этими изменениями. Для этих целей важно понимать сущность процессов и образуемых ими систем. Ключом к этому пониманию (а как следствие и совершенствованию) был, есть и будет анализ данных — независимо от его видов, типов и форм реализации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р.В. Зыков «Роман с Data Science. Как монетизировать большие данные». — издательство «Питер», 2021. — 219–230 с.
2. Алексей Колоколов «Заставьте данные говорить». — издательство «Альпина ПРО», 2023. — 137–145 с.
3. Саманта Клейнберг «Почему. Руководство по поиску причин и принятию решений». — издательство «Манн, Иванов и Фербер», 2017. — 48–72 с.
4. Кирилл Еременко «Работа с данными в любой сфере: Как выйти на новый уровень, используя аналитику». — пер. с англ. — издательство «Альпина Паблишер», 2019. — 30–44 с.

© Хаков Евгений Маратович (evgenyhakov@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СОВРЕМЕННЫХ CRM-СИСТЕМАХ

THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES IN MODERN CRM SYSTEMS

M. Khomutinnikov

Summary. The widespread development and integration of the tools of the information technology segment testifies to the enormous relevance of informatization today. A significant area of development and implementation of these tools is the optimization and improvement of business efficiency. At the same time, special attention paid to intelligent technologies in the development of these solutions. The main purpose of the presented article is to analyze the application of modern CRM systems based on artificial intelligence. The author discusses the key features and possibilities of using artificial intelligence technologies in modern CRM systems. The key advantages are analyzed and systematized, the relevance and necessity of implementing intelligent CRM systems in modern enterprises and organizations are substantiated. Because of the work, a comparative analysis of classical and intelligent CRM systems carried out, aimed at confirming the prevalence of the latter over the former. The author suggests possible options for the development and improvement of modern CRM systems through the integration of artificial intelligence technologies. The materials of the work can be useful for representatives of modern business, confirming the significant need to integrate CRM systems based on artificial intelligence to optimize and increase efficiency in ensuring the functioning of their business processes.

Keywords: artificial intelligence, business, CRM system, informatization, intelligent technologies, business process.

Хомутильников Максим Андреевич

Аспирант, Российская Академия Народного Хозяйства
и Государственной Службы
при Президенте Российской Федерации
maxkhom5@gmail.com

Аннотация. Повсеместное развитие и интеграция инструментов сегмента информационных технологий свидетельствует о колоссальной актуальности информатизации на сегодняшний день. Значимым направлением разработки и внедрения данных инструментов является оптимизация и повышение эффективности работы бизнеса. При этом особое внимание при разработке данных решений относится к интеллектуальным технологиям. Основной целью представленной статьи является выполнение анализа относительно применения современных CRM-систем на базе искусственного интеллекта. Автором рассматриваются ключевые особенности и возможности применения технологий искусственного интеллекта в современных CRM-системах. Анализируются и систематизируются ключевые преимущества, обосновывается актуальность и необходимость внедрения в современных предприятиях и организациях именно интеллектуальных CRM-систем. В результате работы проведен сравнительный анализ классических и интеллектуальных CRM-систем, направленный на подтверждение превалирования вторых над первыми. Автором предложены возможные варианты развития и усовершенствования современных CRM-систем за счет интеграции технологий искусственного интеллекта. Материалы работы могут быть полезны для представителей современного бизнеса, подтверждая значимую необходимость интеграции CRM-систем на базе искусственного интеллекта для оптимизации и повышения эффективности в обеспечении функционирования своих бизнес-процессов.

Ключевые слова: искусственный интеллект, бизнес, CRM-система, информатизация, интеллектуальные технологии, бизнес-процесс.

Введение

Актуальность повсеместной интеграции CRM-систем во многом обуславливается потребностью в автоматизации процессов взаимодействия с клиентами и управлением информацией о них [1]. Использование данных инструментов позволяет значительно повысить эффективность работы с клиентами, а также оптимизировать смежные бизнес-процессы на предприятии (в организации). Использование CRM-систем стало одним из основных трендов в информатизации и цифровизации современного бизнеса [2]. Это подтверждается прогнозами современных статистических исследовательских центров, которые указывают на то, что объем рынка CRM-систем к 2027 году может достигнуть 115 миллиардов долларов. По другим данным глобального исследовательского центра «Fortune Business Insights» рынок может достичь к 2028 году свыше 130 миллиардов долларов. При этом показатели

рентабельности вложений в данный рынок показывают тридцатикратный прирост вложенных инвестиций. Совокупность данных факторов свидетельствует о том, что инвестиции современных предприятий и компаний в технологии CRM является разумным и достаточно рентабельным вложением.

Ключевым вопросом в рассматриваемой сфере на момент 2024 года является усовершенствование CRM за счет интеграции передовых инновационных технологий, примером которой является искусственный интеллект (далее — ИИ). Стоит подчеркнуть, что интеграция ИИ в CRM является относительно новым направлением, требующим особого внимания к своему рассмотрению. На сегодняшний день до конца не ясны реальные преимущества и возможности применения интеллектуальных технологий в CRM-системах. Автором представленного исследования ставится задача комплексного анализа особенностей, возможностей и преимуществ

использования ИИ в CRM. Автором также проводится сравнительный анализ классических CRM с интеллектуальными. Определяется актуальность и необходимость применения технологий ИИ в данных инструментах, а также предлагаются возможные варианты развития и усовершенствования современных CRM-систем за счет интеграции технологий искусственного интеллекта.

Результаты и обсуждение

Использование искусственного интеллекта в CRM-системах 2024 года представляет собой интеграцию умных алгоритмов для анализа данных, автоматизации процессов и улучшения взаимодействия с клиентами [3]. ИИ помогает CRM-системам лучше понимать поведение пользователей и прогнозировать их потребности, делая маркетинговые и продажные стратегии более точными. Благодаря машинному обучению и обработке больших данных, CRM-системы могут анализировать огромные объемы информации, включая историю покупок, поведение на веб-сайте, социальные сети и взаимодействия с клиентами. Это позволяет создавать персонализированные предложения и прогнозы, улучшая качество обслуживания.

ИИ в CRM также способствует автоматизации рутинных задач, таких как сортировка лидов, сегментация клиентов и ответы на простые запросы. Благодаря технологиям обработки естественного языка (NLP), чат-боты и голосовые помощники становятся способ-

ны отвечать на вопросы клиентов в реальном времени, снижая нагрузку на человеческие ресурсы и труд [4]. ИИ также помогает обнаруживать паттерны в данных, что позволяет компаниям принимать более обоснованные решения и выявлять потенциальные проблемы до их возникновения. Одной из ключевых особенностей ИИ в CRM-системах является возможность постоянного самообучения. Алгоритмы машинного обучения могут адаптироваться к изменяющимся условиям, улучшая качество прогнозов и точность рекомендаций. Это позволяет CRM-системам быть более гибкими и подстраиваться под нужды бизнеса, улучшая клиентский опыт и повышая эффективность работы с данными.

Представленные данные подтверждают современные тенденции, определяемые активным развитием и интеграцией интеллектуальных CRM-систем [5]. Данные тенденции подтверждаются возможностью повышения экономической эффективности современных компаний до 30 % по данным последним исследований. Также подтверждается, что внедрение генеративного ИИ в бизнесе позволяет реагировать CRM-системам на запросы клиентов и партнеров на 50 % быстрее относительно классических инструментов.

Среди других преимуществ при использовании ИИ в современных CRM-системах отмечается персонализация обслуживания, возможность прогнозирования и аналитики, оптимизация управления и иные. В табл. 1 представлены результаты авторского анализа и систе-

Таблица 1.

Преимущества использования ИИ в CRM-системах

№	Преимущество	Состав
1	Автоматизация процессов	ИИ помогает автоматизировать рутинные задачи, такие как сортировка лидов, сегментация клиентов, обработка запросов и выполнение повторяющихся операций, что освобождает время для сотрудников и повышает эффективность работы
2	Персонализация обслуживания	ИИ анализирует поведение клиентов, их предпочтения и историю взаимодействий, создавая персонализированные предложения и рекомендации, которые повышают лояльность и удовлетворенность клиентов
3	Прогнозирование и аналитика	Благодаря анализу больших данных и машинному обучению, ИИ может предсказывать поведение клиентов, выявлять скрытые паттерны и тренды, что способствует более точному планированию продаж и маркетинговых стратегий
4	Повышение точности маркетинга	ИИ позволяет улучшать таргетинг рекламных кампаний, выявляя наиболее перспективные сегменты аудитории и предлагая индивидуализированные маркетинговые сообщения, что приводит к росту конверсии
5	Оптимизация управления взаимоотношениями с клиентами	ИИ обеспечивает более эффективное взаимодействие с клиентами на всех этапах их жизненного цикла, помогая компаниям лучше понять потребности клиентов и своевременно реагировать на их запросы
6	Чат-боты и виртуальные помощники	Технологии обработки естественного языка (NLP) и машинного обучения позволяют использовать чат-боты и голосовые помощники, которые могут автоматизировать ответы на частые вопросы и взаимодействие с клиентами, снижая нагрузку на поддержку
7	Повышение удовлетворенности клиентов	ИИ помогает компаниям быстрее и точнее реагировать на запросы клиентов, улучшая качество обслуживания и повышая удовлетворенность клиентов

матизации основных преимуществ использования технологий искусственного интеллекта в CRM-системах на момент 2024 года.

Актуальность и необходимость внедрения интеллектуальных CRM-систем также определяется тем, что современные предприятия сталкиваются с растущей конкуренцией, стремительным развитием цифровых технологий и изменяющимися потребительскими предпочтениями [6]. В этом контексте внедрение интеллектуальных CRM-систем, основанных на использовании технологий искусственного интеллекта, становится не просто желательным, а необходимым условием для успешного ведения бизнеса и обеспечения устойчивого роста. В условиях перенасыщенности рынка и возрастающих требований со стороны потребителей компании должны предлагать уникальный и персонализированный подход к каждому клиенту. ИИ предоставляет возможность сегментировать клиентскую базу на основе данных и анализа их поведения, предугадывать потребности и предпочтения клиентов, что значительно повышает эффективность взаимодействия и уровень лояльности. Автоматизация таких задач с использованием ИИ освобождает значительное количество ресурсов, позволяя сосредоточить внимание на стратегических инициативах и инновациях.

Другим важным фактором является аналитика данных. Современные предприятия генерируют и получают огромные объемы данных о своих клиентах через различные каналы взаимодействия: веб-сайты, социальные сети, колл-центры и многое другое. Интеллектуальные CRM-системы позволяют не просто хранить эти данные, но и использовать их для прогнозирования поведения клиентов, анализа трендов и выявления скрытых закономерностей. Машинное обучение и глубокий анализ данных делают возможным точное прогнозирование спроса, что позволяет организациям заранее подготовиться к изменяющимся условиям рынка и корректировать свои предложения. Компании, которые активно используют ИИ в своих CRM-системах, могут заранее определять проблемные зоны, предотвращать отток клиентов и своевременно реагировать на изменения в поведении аудитории.

Не менее важной становится роль интеллектуальных CRM-систем в сфере маркетинга и продаж. Современные маркетинговые кампании требуют все более точного таргетинга и персонализированных предложений. ИИ в CRM помогает оптимизировать этот процесс за счет анализа поведения клиентов, их взаимодействия с брендом, предшествующих покупок и интересов [7]. Это позволяет предлагать клиентам именно те товары или услуги, которые они ищут, увеличивая вероятность успешных продаж и снижая затраты на маркетинг. Такой подход также способствует повышению удовлетворен-

ности клиентов, так как они получают предложения, которые максимально соответствуют их ожиданиям и потребностям.

Необходимость внедрения интеллектуальных CRM-систем также обусловлена развитием технологий обработки естественного языка и искусственных агентов. Чат-боты и виртуальные помощники, встроенные в CRM-системы, играют важную роль в улучшении клиентского опыта. Они могут эффективно обрабатывать большое количество запросов в реальном времени, помогая клиентам решать их проблемы, делать заказы или получать необходимую информацию [8]. Это особенно важно для предприятий с большим объемом взаимодействий, где быстрое и качественное обслуживание становится критически важным конкурентным преимуществом. Интеллектуальные CRM-системы, используя технологии NLP, могут существенно сократить время ожидания клиентов и повысить общую эффективность работы службы поддержки.

Также значимым аспектом является способность интеллектуальных CRM-систем к адаптации и самообучению. Машинное обучение, являющееся основой ИИ, позволяет системам накапливать знания и улучшать свои алгоритмы в процессе работы, что делает их гибкими и способными к адаптации под изменяющиеся условия. Это важно для компаний, которые работают в динамичных секторах и должны быть готовы к быстрым изменениям в потребностях клиентов или рыночной конъюнктуре. Внедрение интеллектуальных CRM-систем способствует улучшению корпоративного управления и повышению эффективности внутренних процессов [9]. Автоматизация взаимодействия с клиентами, интеграция данных с различных платформ и использование аналитических инструментов на основе ИИ дают руководителям компаний возможность принимать более обоснованные и своевременные решения. В результате снижаются операционные риски, оптимизируются бизнес-процессы и повышается общая производительность предприятия.

Совокупность данных факторов подтверждает высокий уровень актуальности и необходимости интеграции CRM-систем на базе ИИ. В современных условиях цифровой трансформации и перехода к экономике, основанной на данных, интеллектуальные CRM-системы становятся важнейшим инструментом для достижения конкурентного преимущества. Компании, игнорирующие внедрение таких решений, рискуют отстать от конкурентов и потерять клиентов. Однако, несмотря на очевидные преимущества использования интеллектуальных CRM-систем, многие компании в России на момент 2024 года по-прежнему предпочитают использовать классические решения без поддержки искусственного интеллекта. Одна из причин заключается в относительно высоких

затратах на внедрение новых технологий, а также в том, что не все предприятия готовы к быстрой цифровой трансформации. Интеллектуальные CRM-системы требуют не только технической адаптации, но и пересмотра внутренних бизнес-процессов, что может казаться сложным и рискованным шагом для компаний с устоявшимися рабочими схемами [10]. Для малого и среднего бизнеса внедрение таких решений зачастую связано с финансовыми и организационными барьерами, а также с нехваткой квалифицированных специалистов, способных поддерживать и развивать систему на базе ИИ.

Помимо этого, многие компании, особенно в традиционных секторах экономики, считают, что классические CRM-системы вполне справляются с текущими задачами по управлению взаимоотношениями с клиентами. Они не видят необходимости в переходе на интеллектуальные системы, так как привыкли к привычным инструментам, а также не ощущают острой потребности в более глубоком анализе данных или автоматизации процессов. Это связано с тем, что текущий уровень взаимодействия

с клиентами, возможно, удовлетворяет запросы бизнеса, и компании не видят значительных преимуществ от внедрения ИИ, которые бы оправдали потенциальные затраты и усилия на переход. В связи с этим автором настоящего исследования проведена работа по сравнению интеллектуальных и классических CRM-систем, результаты которого приложены в табл. 2.

Результаты анализа показывают, что интеллектуальные CRM-системы значительно более эффективны и рациональны в сравнении с классическими за счет возможностей искусственного интеллекта. Основные причины этого по мнению автора заключаются в следующем:

1. Предсказательная аналитика — ИИ способен анализировать большие объемы данных и предсказывать поведение клиентов, что позволяет компаниям планировать свои действия с большей точностью, чего классические CRM-системы не могут обеспечить;
2. Автоматизированная персонализация — интеллектуальные CRM-системы используют ИИ для соз-

Таблица 2.

Сравнительный анализ интеллектуальных и классических CRM-систем

№	CRM	Состав	Возможности	Эффекты от внедрения	Рентабельность
1	Классические CRM-системы	Сосредоточены на базовом управлении взаимоотношениями с клиентами, предоставляя инструменты для хранения контактных данных, отслеживания взаимодействий с клиентами и управления продажами. Они поддерживают основные бизнес-процессы, но не включают в себя функции, связанные с анализом больших данных или автоматизацией с использованием искусственного интеллекта	<ul style="list-style-type: none"> — Управление контактами и историей взаимодействий — Ведение баз данных клиентов и потенциальных клиентов — Планирование и контроль продаж, управление воронкой продаж — Отслеживание и анализ сделок, простые отчеты 	<ul style="list-style-type: none"> — Улучшение организации данных о клиентах — Повышение эффективности работы отдела продаж за счет централизованного хранения информации — Упрощение управления задачами и взаимодействиями с клиентами — Оптимизация документооборота и внутренней коммуникации 	Классические CRM-системы обладают более низкими издержками на внедрение и обслуживание по сравнению с интеллектуальными системами. Они могут быть рентабельны для малого и среднего бизнеса, который не нуждается в сложных инструментах анализа. Однако в долгосрочной перспективе их возможности ограничены, что может снижать конкурентоспособность компании в условиях роста рынка и развития цифровых технологий
2	Интеллектуальные CRM-системы	Представляют современные решения, которые используют технологии искусственного интеллекта, машинного обучения и анализа данных для более глубокого понимания потребностей клиентов и оптимизации внутренних процессов. Такие системы способны автоматизировать рутинные задачи, анализировать большие массивы данных и предлагать персонализированные решения для каждого клиента на основе их поведения и предыдущих взаимодействий	<ul style="list-style-type: none"> — Автоматизация маркетинговых и продажных процессов — Предсказательная аналитика для прогнозирования поведения клиентов — Персонализированные предложения на основе анализа данных — Чат-боты и виртуальные ассистенты для взаимодействия с клиентами в реальном времени — Автоматическая сегментация клиентской базы и оптимизация взаимодействий 	<ul style="list-style-type: none"> — Повышение эффективности маркетинговых кампаний через точный таргетинг — Улучшение клиентского опыта за счет персонализированных предложений и быстрого обслуживания — Оптимизация работы службы поддержки за счет использования чат-ботов и автоматизированных инструментов — Более точное прогнозирование спроса и повышение уровня удержания клиентов 	Хотя внедрение интеллектуальных CRM-систем может потребовать значительных затрат на начальном этапе, их долгосрочные выгоды могут многократно окупить инвестиции. Сокращение расходов на поддержку клиентов, повышение конверсии продаж и снижение операционных издержек за счет автоматизации могут существенно повысить общую рентабельность предприятия

- дания персонализированных предложений в режиме реального времени на основе поведения и предпочтений клиента, тогда как классические системы ограничены шаблонными подходами;
3. Машинное обучение — ИИ обучается на накопленных данных и постоянно улучшает свои алгоритмы, адаптируясь к новым условиям, что делает взаимодействие с клиентами более эффективным, чего нельзя достичь с помощью классических решений;
 4. Чат-боты и виртуальные помощники — интеллектуальные CRM могут автоматизировать взаимодействие с клиентами через чат-боты и ассистентов, обрабатывая запросы в реальном времени без участия сотрудников, что существенно ускоряет процесс обслуживания. Классические CRM-системы не обладают такими возможностями.

Несмотря на текущие тенденции, показывающие значительные результаты и возможности при использовании интеллектуальных CRM-систем, остается множество задач, нашедших своего решения на текущем этапе их развития. В связи с этим автором настоящего исследования определяются следующие перспективные направления возможного развития интеллектуальных CRM-систем до 2030 года, отраженные в табл. 3.

Данные направления открывают возможности для более эффективного и точного управления клиентским

опытом, что сделает бизнесы более конкурентоспособными в условиях цифровой экономики. Определенные автором рамки до 2030 года обусловлены Концепцией «Цифровая трансформация 2030» разработанной во исполнение указов Президента Российской Федерации Путина В.В. от 09.05.2017 № 203 «О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы». В связи с этим, перспективным направлениям развития искусственного интеллекта в CRM-системах необходимо уделять значительное внимание со стороны бизнеса и государства. Важно активно инвестировать в исследования и разработки в этой области, чтобы обеспечить лидерство отечественных компаний на глобальном рынке и повысить конкурентоспособность экономики. Реализация этих технологий не только поддержит цифровую трансформацию, но и способствует улучшению качества взаимодействия с клиентами, созданию новых рабочих мест, а также росту доходов компаний за счет оптимизации бизнес-процессов и повышения эффективности управления.

Особое внимание следует уделить подготовке специалистов и созданию инфраструктуры для внедрения таких решений, что будет способствовать их активному развитию. Компании, которые своевременно адаптируют интеллектуальные CRM-системы и инвестируют в их развитие, смогут не только улучшить клиентский сервис, но и значительно увеличить свою прибыль за счет использования передовых аналитических инструментов

Таблица 3.

Перспективные направления совершенствования CRM-систем

№	Направление	Ожидаемый эффект
1	Профессионализация клиентского опыта	Развитие ИИ в CRM-системах позволит создавать еще более точные и персонализированные рекомендации. Системы смогут анализировать поведение клиента в реальном времени, учитывать эмоции и предлагать решения, которые не только соответствуют текущим запросам, но и предсказывают потребности на будущее. Это позволит создать максимально адаптированный и индивидуализированный подход к каждому клиенту
2	Анализ настроений и эмоций	С помощью технологий искусственного интеллекта и обработки естественного языка CRM-системы смогут анализировать не только контент сообщений, но и эмоциональный тон клиента. Это откроет возможности для создания более точного понимания уровня удовлетворенности клиента и поможет улучшить качество обслуживания, моментально реагируя на негативные эмоции
3	Автономное управление клиентскими процессами	CRM-системы с продвинутым ИИ смогут самостоятельно управлять комплексными клиентскими процессами. Например, такие системы смогут определять лучшие временные рамки для взаимодействия, управлять коммуникациями через все доступные каналы, а также разрабатывать и внедрять кампании, почти полностью исключая участие человека
4	Интеграция с когнитивными технологиями	внедрение ИИ, который способен обучаться на основе когнитивных моделей, позволит CRM-системам не только предсказывать поведение клиентов, но и формировать глубокие стратегии долгосрочного взаимодействия. Такие технологии могут использовать опыт клиента и его развитие как индивидуальной единицы в рамках компании, создавая прогнозы на годы вперед
5	Прогнозирование и предотвращение клиентского оттока	более продвинутые алгоритмы машинного обучения могут глубже анализировать данные о клиентах, выявляя скрытые индикаторы, которые предсказывают отток. Системы смогут предупреждать сотрудников задолго до того, как клиент решит прекратить взаимодействие, и предложить конкретные меры по удержанию

и автоматизации. Внедрение данных технологий также позволит бизнесам реагировать на изменения рынка быстрее и гибче, что особенно актуально в условиях ускоренной цифровизации и глобальной конкуренции. Так, для успешного достижения целей, обозначенных в Концепции «Цифровая трансформация 2030», необходимо создать благоприятные условия для интеграции интеллектуальных CRM-систем, активно поддерживать их развитие и внедрение как в крупных корпорациях, так и в малом и среднем бизнесе.

Заключение

Таким образом, основной целью статьи являлось выполнение анализа относительно применения современных CRM-систем на базе искусственного интеллекта. В рамках работы автором были рассмотрены ключевые особенности и возможности применения технологий искусственного интеллекта в CRM-системах 2024 года. Проведен анализ и систематизация основных преимуществ интеллектуальных CRM, обоснована их актуальность и необходимость внедрения в современных предприятиях и организациях. В результате работы осуществлен сравнительный анализ классических и интеллектуальных CRM-систем, подтверждающий преобладание вторых над первыми. Также предложены возможные варианты развития и усовершенствования CRM-систем через интеграцию технологий искусственного интеллекта.

Автором определено, что несмотря на очевидные преимущества, многие компании в России продолжают использовать классические CRM-системы без поддержки ИИ. Это объясняется как финансовыми барьерами и сложностью внедрения, так и недостаточной готовностью предприятий к цифровым изменениям. Классические системы, хотя и эффективны для базового

управления взаимодействиями с клиентами, уже не соответствуют современным требованиям и ограничены в своих возможностях. Интеллектуальные CRM-системы предлагают гораздо более широкий функционал. ИИ позволяет анализировать большие объемы данных, предсказывать поведение клиентов, автоматизировать рутинные задачи и персонализировать взаимодействие с каждым клиентом. Это ведет к повышению уровня удовлетворенности клиентов, увеличению продаж и снижению операционных расходов. В то время как классические системы остаются полезными для малого бизнеса с ограниченными задачами, их возможности уже не могут конкурировать с потенциалом интеллектуальных решений.

Перспективы развития CRM-систем с интеграцией ИИ открывают новые горизонты для бизнеса. Профессионализация клиентского опыта, анализ настроений и эмоций, автономное управление процессами, когнитивные технологии и прогнозирование клиентского оттока — это лишь некоторые из перспективных направлений, которые позволят компаниям достичь новых высот в управлении взаимоотношениями с клиентами. Эти инновации уже сегодня начинают трансформировать подход к взаимодействию с клиентами, и до 2030 года, в рамках Стратегии «цифровой трансформации России», ожидается их широкое распространение и развитие. В заключение следует отметить, для того чтобы оставаться конкурентоспособными в условиях глобальной цифровой экономики, компании должны активно инвестировать в интеллектуальные CRM-системы, адаптировать их к своим бизнес-процессам и обучать сотрудников новым технологиям. Это позволит не только повысить эффективность взаимодействия с клиентами, но и обеспечить устойчивое развитие бизнеса в долгосрочной перспективе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тихомирова М.С., Войстрик Д.В. Использование технологий искусственного интеллекта в условиях цифровой экономики // ТТПС. 2023. №3 (65). С. 73–80.
2. Макарова Н.В. Использование CRM-систем субъектами малого бизнеса // Экономика и бизнес: теория и практика. 2021. №5–2. С. 140–144.
3. Шелковый С.О. Роль управления клиентскими отношениями (CRM) в повышении продаж IT-продуктов // Евразийский научный журнал. 2024. №2. С. 28–34.
4. Крюкова А.А., Гайдук А.Е., Захарченко Г.В. Специфика применения искусственного интеллекта в современных CRM-системах // Индустриальная экономика. 2023. №2. С. 30–35.
5. Кучумов А.В., Тестина Я.С. CRM-системы: история, сущность, классификация // ЭВ. 2022. №1 (28). С. 41–46.
6. Веселова Ю.В. Место CRM-системы в управлении современной организацией // The Scientific Heritage. 2021. №68–4. С. 3–5.
7. Тюрина Д.А., Крюкова А.А. AI-технологии в революции CRM-систем // Индустриальная экономика. 2023. №4. С. 28–31.
8. Гильдингерш М.Г. Влияние технологий искусственного интеллекта на систему человекоориентированного управления компанией // Социология. 2024. №4. С. 48–55.
9. Филимонова В.Д. CRM-системы как инструмент повышения эффективности бизнеса // Бюллетень науки и практики. 2020. №2. С. 235–240.
10. Ильичёв А.Ю. Использование машинного обучения для систем CRM // Форум молодых ученых. 2019. №1–2 (29). С. 40–43.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ ФАКТОРИНГОВЫХ РЕШЕНИЙ

DESIGNING AN INFORMATION SYSTEM TO SUPPORT FACTORING DECISIONS

**A. Chuvakov
R. Boryaev**

Summary. Due to the continuous growth of the Russian factoring products market, participants in this market are faced with the need to gain competitive advantages, including using new approaches in the field of management. The integrated use of organizational systems management methods and the use of innovative approaches and technologies can be used as a tool to gain these advantages over competitors. This article focuses on risk management in decision-making in the field of factoring. The risks considered include unfavorable indicators of client companies, inclusion in sanctions lists, data from insurance and rating agencies and other significant financial indicators. The possibility of expanding the existing approach to building automated information systems to support factoring decisions with an additional module for calculating the commission rate for a transaction in real time for each individual transaction, considering the widest available set of input values that affect the formation of risks for the factor company is considered. Attention is focused on the impossibility of building such a system based on classical algorithms. The use of quantum computing for this module is proposed. The structure of the incoming information necessary for the implementation of the task is analyzed, a general concept of risk analysis is built. The ontological model contains all the information on the interaction of elements that affect the occurrence of risks for the factor company and provides their assessment in the form of deciding on the rate or the impossibility of conducting a transaction.

Keywords: automated information systems, factoring, quantum computing, quantum Monte Carlo method, ontology, knowledge base.

Чуваков Александр Владимирович

Кандидат химических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет»
avch2105@gmail.com

Боряев Родион Олегович

Аспирант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет»
r.boryaev@gmail.com

Аннотация. В силу непрерывного роста российского рынка факторинговых продуктов участники данного рынка сталкиваются с необходимостью получения конкурентных преимуществ, в том числе за счет использования новых подходов в области управления. Комплексное использование методов управления организационными системами и использование инновационных подходов и технологий может быть использовано в качестве инструмента по получению данных преимуществ перед конкурентами. В данной статье уделено внимание управлению рисками при принятии решений в сфере факторинга. В качестве рисков рассматриваются неблагоприятные показатели компаний клиентов, попадание в санкционные списки, данные страховых и рейтинговых агентств и иные значимые финансовые показатели. Рассматривается возможность расширить существующий подход к построению автоматизированных информационных систем поддержки принятия факторинговых решений дополнительным модулем по расчету ставки комиссии по сделке в реальном времени по каждой отдельной сделке с учетом наиболее широкого доступного множества входных величин, имеющих влияние на формирование рисков для компании фактора. Акцентируется внимание на невозможности построения такого рода системы на основе классических алгоритмов. Предлагается применение квантовых вычислений для указанного модуля. Проанализирована структура входящей информации, необходимая для реализации поставленной задачи, построена общая концепция анализа рисков. Онтологическая модель содержит всю информацию о взаимодействии элементов, влияющих на наступление рисков для компании фактора и обеспечивает их оценку в виде принятия решения по ставке или отсутствия возможности по проведению сделки.

Ключевые слова: автоматизированные информационные системы, факторинг, квантовые вычисления, квантовый метод Монте-Карло, онтология, база знаний.

Введение

Особыми видами специализированной управленческой деятельности, выделившиеся в процессе разделения управленческого труда, являются функции управления. Наиболее простым и доступным для понимания является деление функций управле-

ния на две группы: общие и специальные функции, т. е. функции по управлению теми или иными объектами организации, в том числе финансами. Важную роль в функции по управлению объектом «финансы» играют современные инструменты по управлению дебиторской задолженностью, в первую очередь факторинг. В наиболее простом понимании факторинг — это про-

даже дебиторской задолженности, а точнее передача агентских функций по её управлению третьей стороне. Совокупный портфель российского рынка факторинга вырос за последние три года с 0.8 до 1.5 триллионов рублей, а объем выплаченного финансирования вырос с 3.1 до 5.8 триллионов рублей. С учетом объема рынка факторинговых операции, невозможно представить себе использование данного финансового продукта без частичной или полной автоматизации с использованием АИС операций, необходимых для его применения. При этом различными программными комплексами может быть реализована как автоматизация по части учета данных, так и автоматизация алгоритмов принятия факторинговых решений.

Наибольшую ценность для предприятия представляет автоматизация алгоритмов принятия факторинговых решений, которая позволяет оперативно принимать решения без привлечения финансовых специалистов и способствует ускорению оборачиваемости финансовых средств, увеличению числа проведенных сделок и позволяет обеспечивать бесперебойные поставки материалов на производства [12].

1. Постановка задачи

Стоимостью факторинга для клиента является комиссия. Компании клиенты оплачивают использование и получение денежных средств под уступку денежных требований. В Российской Федерации не установлен законодательными актами единый порядок или общая формула стоимости факторинга, поэтому каждый фактор может определять свой собственный порядок по определению стоимости факторинга для клиентов. Это обуславливает возможные различия при рассмотрении принципов расчета стоимости факторинга у разных участников данного рынка.

Однако, мы можем выделить основные компоненты, влияющие на формирование размера комиссии для клиентов факторинга:

- Единовременная комиссия — это определенный процент от общей суммы выдаваемых средств, фиксирован компанией-фактором.
- Факторинговая комиссия (проценты годовых от выдаваемой суммы, наиболее интересный для нас в рамках данной работы компонент, является по факту показателем риска данной факторинговой операции для компании фактора).
- Комиссия за обработку документов (так же фиксирована компанией фактором).

Отсутствие общих принципов и законодательной базы по расчету и принятию оплаты в счет проведения факторинговых операций определяет возможность со стороны факторинговых организаций устанавливать

собственный порядок и правила взаиморасчета с финансируемыми организациями. Уровень ставки факторинговой комиссии устанавливается в процентах годовых. Фактический срок использования привлекаемых средств и количество дней в году также определяет размер комиссии.

Таким образом, стоимость операции факторинга для финансируемой организации определяется уровнем риска этой операции для компании фактора. С высоким риском растет и ставка, либо происходит отказ от финансирования клиента.

Влияние на уровень риска операции формируют:

- финансовое положение на рынке финансируемой компании;
- присутствие или отсутствие условия регресса;
- отрасль экономики клиента;
- вид контракта;
- история взаимодействия с контрагентом;
- время предоставления отсрочки платежа;
- текущий курс валюты сделки;
- задействованные в сделке ключевые ставки.

Каждый из этих элементов состоит из множества параметров, и таким образом расчет эффективной факторинговой комиссии в автоматизированной информационной системе с учетом количества факторинговых сделок в день для каждой отдельной сделки индивидуально представляется невозможным с использованием классических алгоритмов и классической вычислительной техники. В рассмотренных нами существующих системах поддержки принятия факторинговых решений возможность расчета эффективной комиссии для каждой отдельной операции в автоматическом режиме отсутствует. В то же время данный механизм позволил бы с одной стороны увеличить объем рынка факторинга, позволив начать формировать предложения с большей ставкой для более рискованных операций, с другой стороны увеличил бы оборачиваемость средств за счет снижения ставки для менее рискованных операций. Для самого фактора же наличие такого инструмента обозначало большее покрытие рисков для каждой отдельной операции.

В статье «Квантовые вычисления в АИС управлениями факторинговыми операциями» [11] нами было показано преимущество квантовых алгоритмов над классическими при применении к отдельным задачам. В частности, квантовая версия алгоритма «Монте-Карло» показывает прирост производительности по сравнению с ее классической версией и может быть использованы в реализации на данный момент не используемой возможности по расчету эффективной ставки факторинговой комиссии для каждой отдельной факторинговой операции в рамках АИС поддержки принятия факторинговых решений.

Для реализации АИС с указанными выше возможностями в рамках данной статьи предлагается построить онтологию информационного пространства в системе принятия факторинговых решений, которая позволит динамически описать типовую предметную область в исследуемой нами информационной системе.

2. Выбор метода построение онтологии и инструментария

Для выполнения данной работы нам будет необходим инструмент, поддерживающий распространенный формальный язык описания онтологий. Данный язык должен содержать описания классов, свойств и экземпляров, должны содержаться свойства-объекты и свойства-значения. Таким образом в качестве языка описания онтологий был выбран Web ontology language (OWL).

В качестве программного продукта, реализующего данный язык был выбран Protégé разработанный Стенфордским университетом. Данный инструмент поддерживает Web Ontology Language (OWL) — язык описания онтологий для семантической паутины. Преимуществами данного продукта является свободная распространяемость, ОКВС-совместимая фреймовая модель знаний, сложная таксономия.

3. Построение онтологии

Для построения онтологии предлагается применять ручной метод, который предполагает прямую сборку элементов онтологии. Согласно данному подходу, для разработки онтологии необходимо сначала отобрать и классифицировать основные понятия, из которых будет она состоять, а затем установить соответствия между ними. Первым шагом предлагается определить таксономию (структуру понятий в виде иерархии, основанной на вложенности [8]). Для этого мы определим набор понятий, которые будут включены в эту иерархию.

Предлагается начать с определения верхнего уровня иерархии разрабатываемой онтологии. Можно выделить такие элементы как документы, бизнес-процессы, документы, субъекты и объекты сделок как первый уровень иерархии АИС Поддержки принятия факторинговых решений.

На следующем этапе разработки базы знаний нужно расширить иерархию, добавим подклассы. К примеру, верхне-уровневое понятие «бизнес-процесс» может быть разбито нами на основные и вспомогательные процессы.

3.1. Бизнес-процессы

Основными бизнес-процессами будут процессы, непосредственно влияющие на принятие решения об одо-

брения факторинговой сделки и вычисления размера комиссии, процессы по получению и приведению входных данных к необходимому для автоматизированной обработки виду. К основным процессам рассматриваемой предметной области можно отнести элементы и их иерархическую классификацию, представленные на рисунке 1.

Как мы отмечали ранее единой законодательной базы для расчета переменного компонента факторинговой комиссии, отвечающего за показатель рискованности факторинговой сделки, не существует, нам необходимо рассмотреть наиболее исчерпывающий перечень возможных процессов, позволяющих всесторонне оценить риски компании фактора по проведению сделки. Необходимо рассмотреть финансовые и юридические риски, а также стоп факторы, препятствующие проведению сделки. Для учета финансовых факторов мы будем использовать индикаторы рейтинговых агентств, а также страховое покрытие кредитных линий, предоставляемое клиентам факторинговых компаний. На рисунке 1 это процессы «Отчеты» и «Страхование», данные для которых предоставляют сторонние организации.

С другой стороны, на финансовые факторы влияет общая ситуация рынка кредитования, за это отвечают процессы «Банковская информация». Оценка юридических факторов, влияющих на возможность и уровень риска проведения факторинговой сделки представлены процессами Know your customer (KYC, «Знай своего клиента») и Know your business partner (KYBP, «Знай своего бизнес партнера»). Данные процессы позволяют определить надежность контрагента для дальнейшего принятия решению по оценке уровня рискованности операции, а также, в случае нахождения совпадений в стоп-листах, и вовсе отказаться от сделки в автоматизированном режиме (при условии нахождения или подозрения на нахождении контрагента в санкционных или иных запрещающих листах).

Всегда необходимо учитывать, что при особых условиях для проведения сделки может понадобиться проведение экспертной оценки. Несмотря на стремление к минимизации данной вероятности, модель должна учитывать такую возможность, для этого необходим процесс «Экспертное решение» в процессах «Взаимодействие с пользователем».

Остальные процессы взаимодействия с пользователем нужны для обслуживания системы и не снижают скорость и эффективность автоматического процесса принятия факторинговых решений.

Аналогично выстраиваем диаграмму для вспомогательных процессов, к которым отнесем логирование данных, архивацию данных, а также систему авториза-

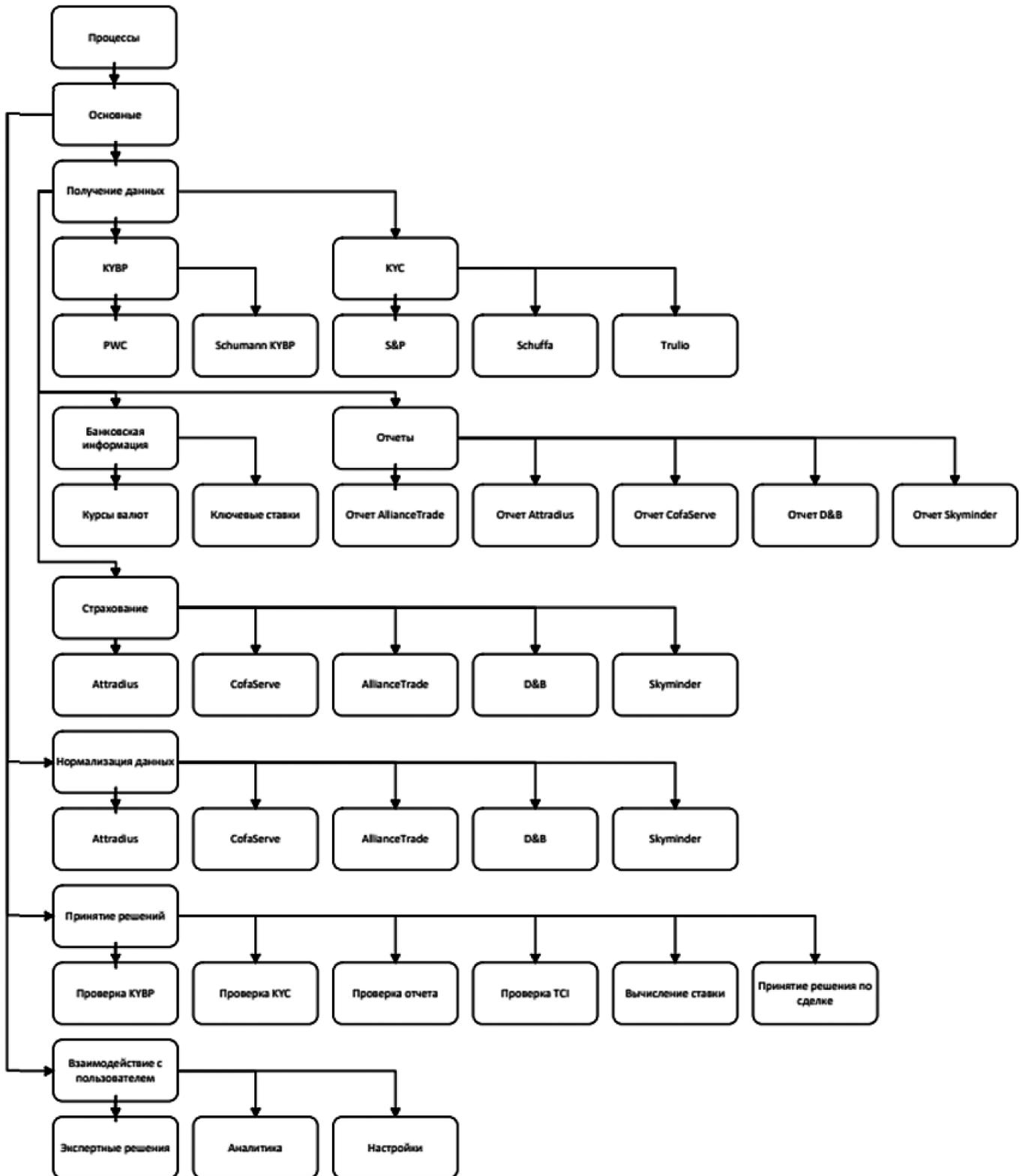


Рис. 1. Основные процессы предметной области

ции пользователей и журналирование событий безопасности. Данные процессы обеспечивают бесперебойное функционирование системы и позволяют использовать ее в качестве элементы информационной системы фак-

торинговой компании с соблюдением всех необходимых норм по информационной безопасности, уровню безотказности, а также соответствию необходимым критериям сертификации для отрасли.

3.2. Механизмы управления

Нам необходимо расширить данную диаграмму, добавив в нее вспомогательные понятия. Для этого, используя нотацию IDEF0, введем в модель документы, субъекты и объекты факторинговых сделок. Данные понятия будут использованы нами в качестве механизмов управления, входов и выходов процессов. Указанные документы, субъекты и объекты будут представлены входами процесса, выходами процессов же будут те же элементы, но преобразованные в необходимое для дальнейшей обработки состояние в результате совершения процесса. Таким образом мы будем использовать

выходы одних процессов как входы, механизмы управления для других.

Результат представлен на рисунке 2.

В качестве множественных элементов для лучшей читаемости диаграммы представлены подобные элементы разных форматов схожей тематики, такие, как например Отчет КУС, который включает отчеты данной разновидности форматах консалтинговых агентств S&P, Schufa и Trulio.

Используя полученные результаты можем дополнить полученную диаграмму схемой отношений между полу-

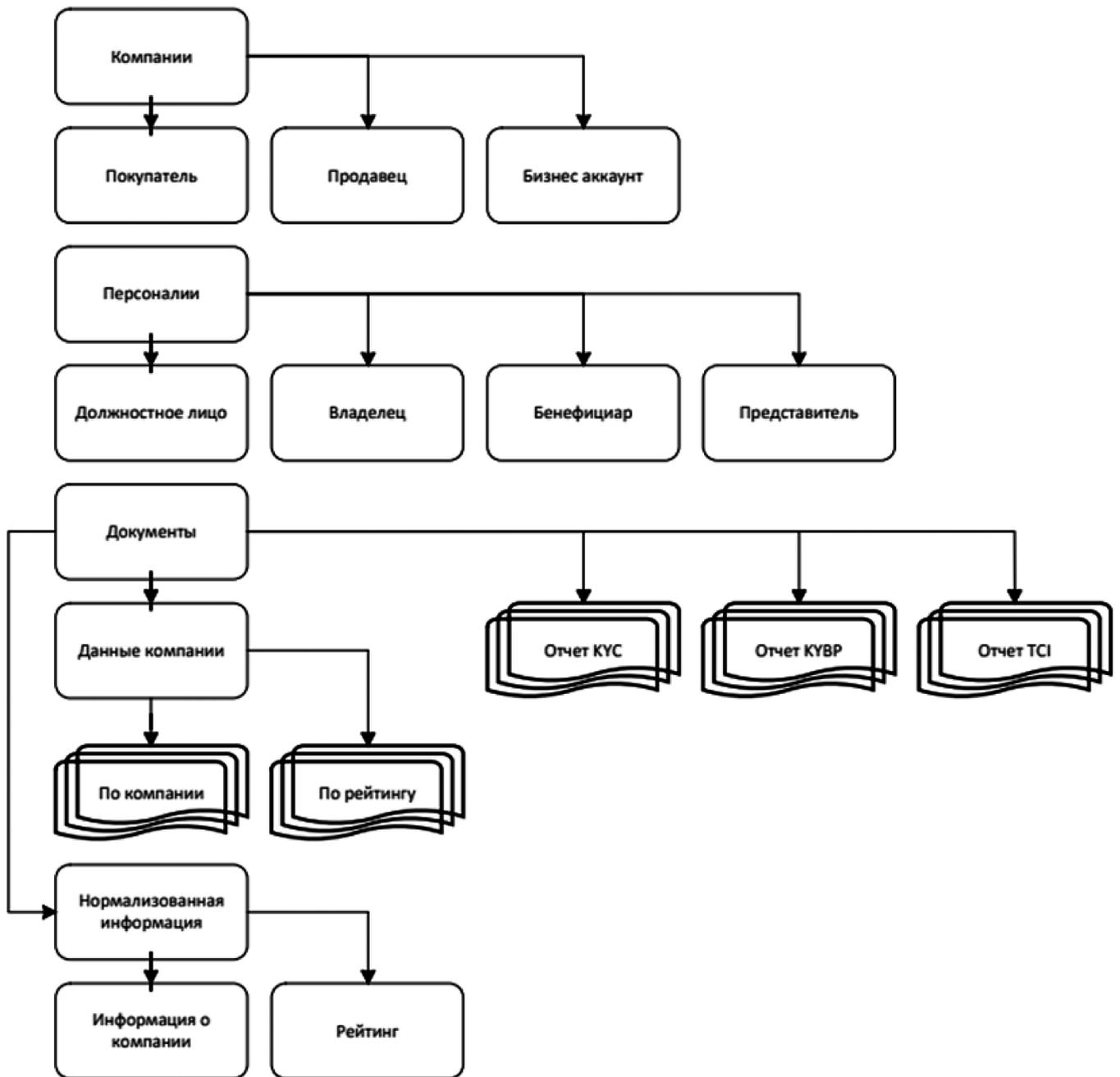


Рис. 2. Субъекты, объекты сделок и документы

ченными концептами. Для примера покажем фрагмент полученной диаграммы со схемой отношений между элементами для процессов получения и нормализация данных на рисунке 3.

Таким образом выходные данные процессов получения информации из различных источников становятся входными данными процессов нормализации данных, которую в свою очередь выдают на выходе нормализованную информацию о компании включающую агрегированную информацию о компании и обобщенный рейтинг компании. Таким же образом устанавливаем отношения между субъектами, объектами сделок, документами и остальными процессами.

Далее на основе представленной концептуальной модели, производится построение онтологии с использованием программного свободно распространяемого редактора Protégé 5.6.3.

Работа в редакторе Protege начинается с создания нового проекта либо выбора существующего. Первым шагом при создании онтологии является создание классов. Все спроектированные нами классы и подклассы отобразятся в окне «Class hierarchy». На рисунке 4 представлены результаты создания классов.

На рисунке 5 представлены ранее смоделированные нами процессы.

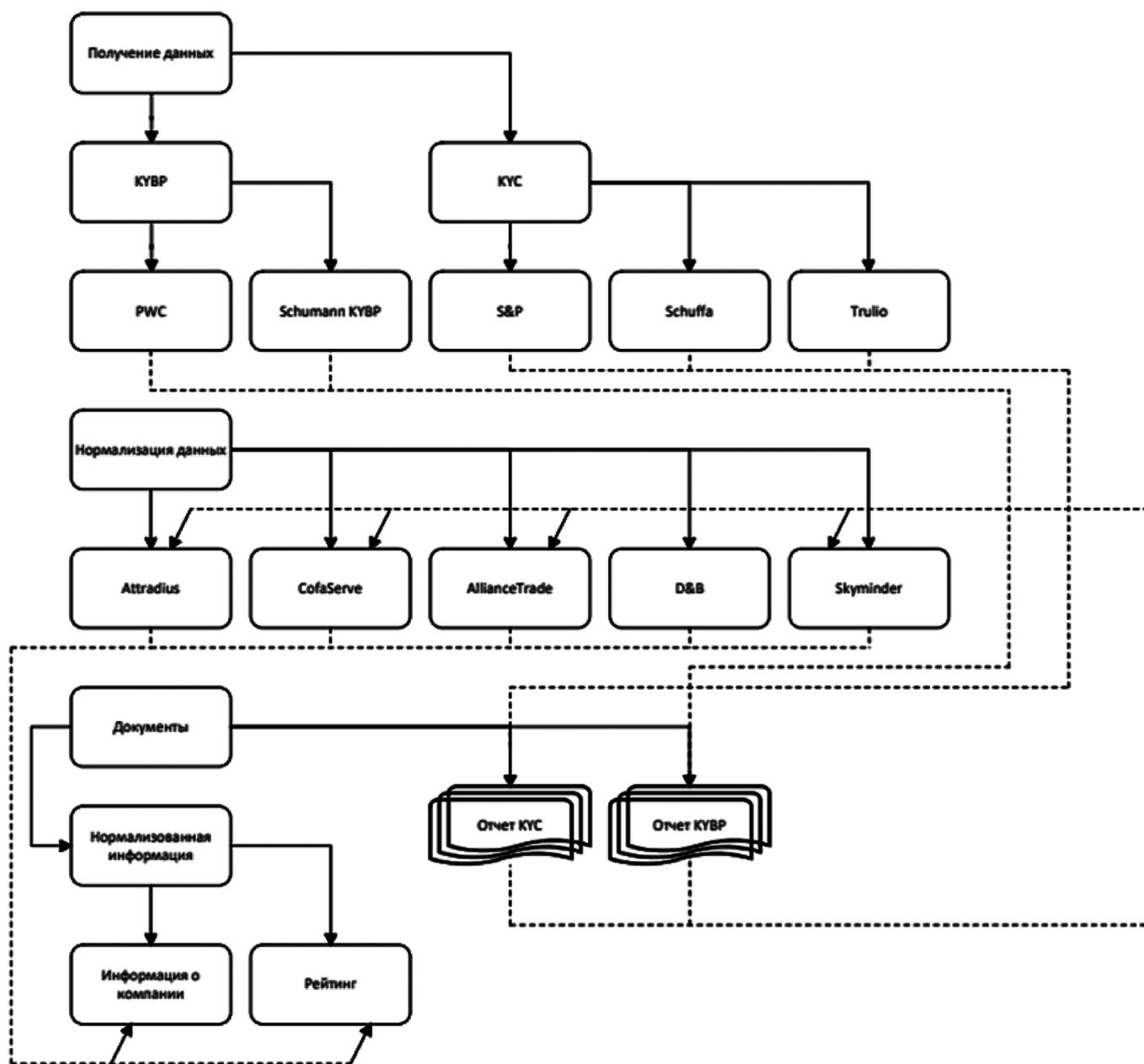


Рис. 3. Отношения между полученными концептами

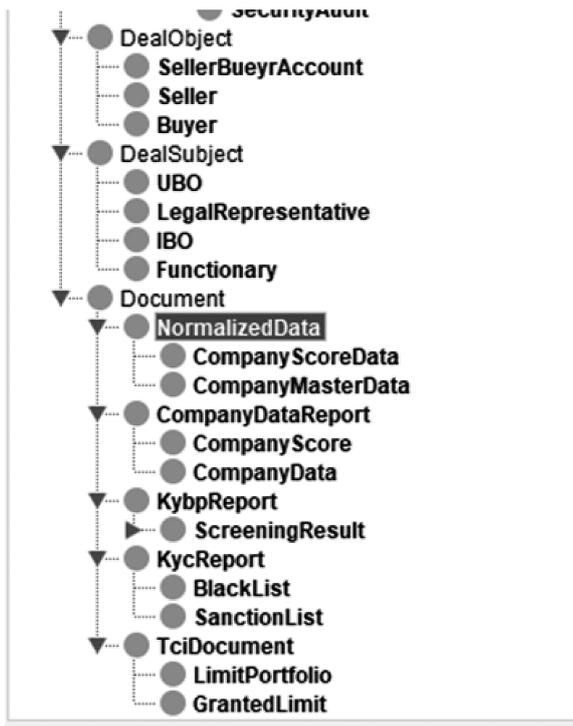


Рис. 4. Документы, компании, персоналии

Следующий шаг создания онтологии, это создание слотов, описывающих свойства классов и отношения между ними, в том числе представленные нами выше связи между данными и процессами:

- получение данных обеспечивается запуском процесса
- вспомогательный процесс обеспечивает выполнение основного процесса

Граф построенной онтологии представлен на рисунке 6.

Завершающим шагом в создании онтологии, является определение свойств классов и наполнение онтологии данными. Создание иерархии классов, аннотаций к ним, наполнение данными и определение свойств производится с помощью дополнительного плагина Cellfie, который предназначен для импорта данных электронных таблиц в онтологию OWL и поставляется вместе с установочным пакетом Protégé.

4. Управление рисками при расчете комиссии факторинговой сделки

Во время создания данной онтологической модели большое внимание уделялось управлению рисками при расчете комиссии факторинговой сделки. По сути, рассчитанная величина есть показатель риска при которой ставка комиссии должна защищать фактора при неблагоприятном прогнозе по возврату средств или высокой вероятности правовых или иных последствий для факторинговой организации. Так же учитывается вариант,

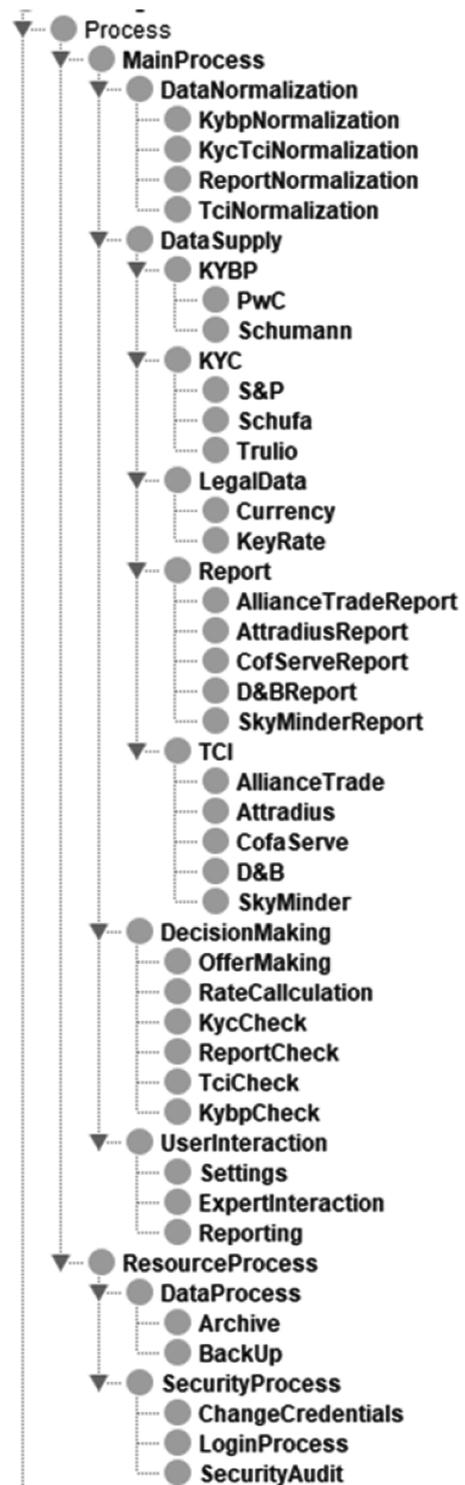


Рис. 5. Процессы

при котором невозможно повлиять размером ставки комиссии на уменьшении фактора риска, в этом случае необходимо принять решение по отказу от сделки. Так как онтологическая модель реализована с использованием Web ontology language. Мы можем использовать запросы Query (class expression) для того, чтобы установить какие входные параметры влияют на размер рассчитанной комиссии.

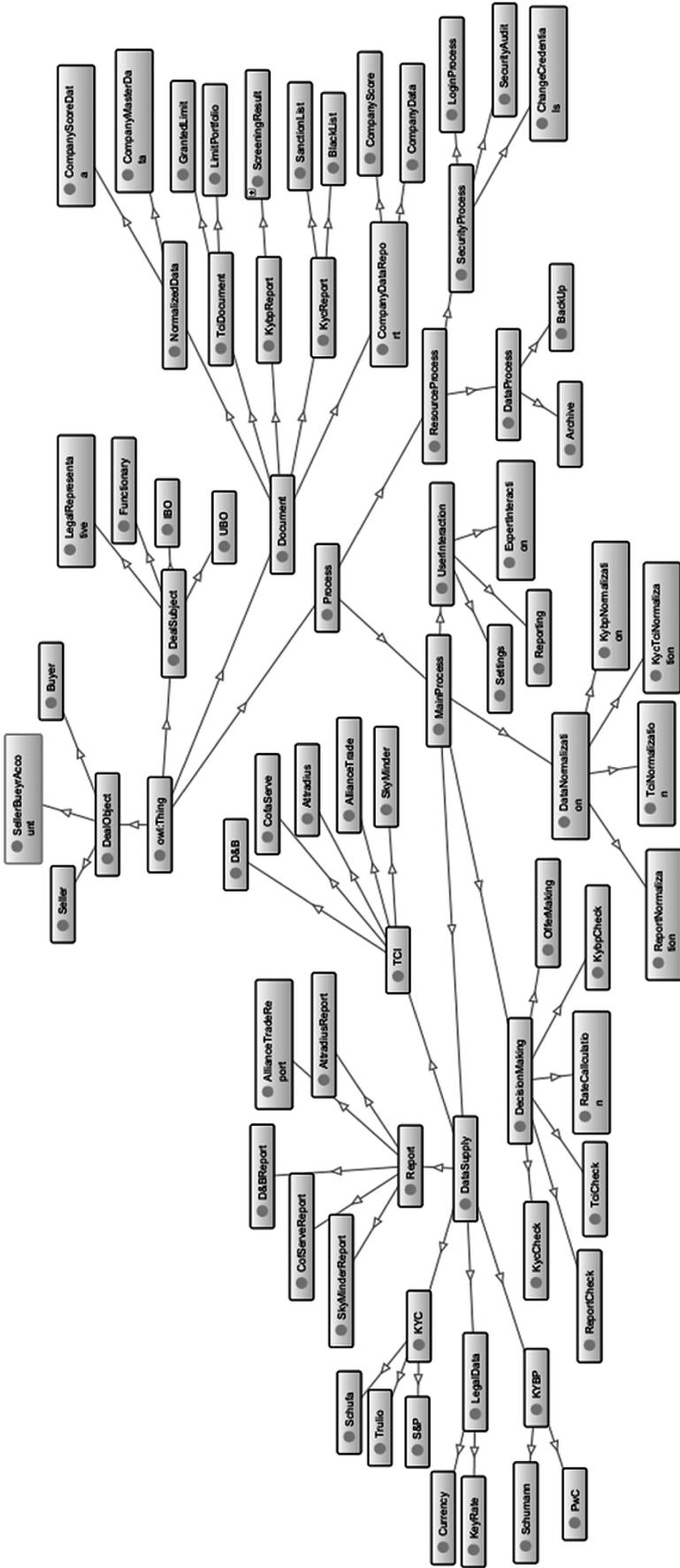


Рис. 6. Визуализация онтологии информационного пространства в плагине OntoGraf программы Protege

Таким образом мы у нас имеется возможность получать рекомендации по корректировке значений входных параметров для обеспечения возможности проведения факторинговых сделок. Данная онтология на следующем этапе нашей работы будет использована при создании архитектуры информационной системы поддержки принятия факторинговых решений. Она позволит эффективно использовать получаемые от сторонних рейтинговых систем данные для расчета комиссии индивидуально для каждой отдельной факторинговой сделки.

Заключение

Результатом данной работы стала онтология, формализующая архитектуру АИС поддержки принятия факторинговых решений с дополнительным модулем вычисления ставки комиссии по отдельным факторинговым

сделкам. Такое решение позволяет более эффективно работать с рисками как со стороны факторингового клиента, так и со стороны фактора, а значит увеличить объем факторинговых сделок на отечественном рынке, что ведет к увеличению доступных средств для частных предприятий, а значит и положительному эффекту для всей экономики страны в целом. Представленная онтология планируется к использованию при разработке автоматизированной информационной системы поддержки принятия факторинговых решений с модулем расчета эффективной комиссии по сделке. Для обеспечения необходимого уровня производительности отдельные модули данной системы будут разработаны с использованием механизма квантовых вычислений, в частности расчет эффективной комиссии планируется вычислять с использованием квантовой версии алгоритма Монте-Карло.

ЛИТЕРАТУРА

1. Копыльцов А.А., Копыльцов А.В. От парадигмы императивного программирования к парадигме квантовых вычислений и далее // Современное программирование: Материалы III Международной научно-практической конференции. Нижневартовск: НВГУ, 2021 — с. 8–9.
2. Мясников А.А., Анализ данных в управлении рисками факторинга // Математическое и компьютерное моделирование в экономике, страховании и управлении рисками, Саратов: Научная книга, 2018. с. 224–227.
3. Грегер С.Э., Поршнева С.В. Построение онтологии архитектуры информационной системы // Фундаментальные исследования №10, УрФУ, 2013 — с. 2405–2409
4. Карин С.А. Построение предметно-ориентированной онтологии в системах обработки пространственных данных // Моделирование систем и процессов, №4, ВКА им Можайского, 2014г. — с. 78–84
5. Еремеев А.П., Ивлеев С.А. Построение онтологии на основе нереляционной базы данных для интеллектуальной системы поддержки принятия решений медицинского назначения // Программные продукты и системы №4, 2017 — с. 739–744
6. Johansson S. Efficient Monte Carlo Simulation for Counterparty Credit Risk Modeling // KTH Royal Institute of Technology, 2019
7. Добров Б.В., Иванов В.В., Лукашевич Н.В., Соловьев В.Д. Онтологии и тезаурусы: модели, инструменты, приложения. — М.: Бином. Лаборатория знаний, 2009.
8. Gruber T.R. What is an Ontology? // Knowledge Systems Laboratory, Stanford University, California. — 2001.
9. Hovy E.A. Standard for Large Ontologies // Workshop on Research & Development.
10. Opportunities in Federal Information Services, <http://www.isi.edu/nsf/papers/hovy2.htm>
11. Боряев Р.О., Чуваков А.В. Квантовые вычисления в автоматизированных системах управления факторинговыми операциями // Вестник СамГТУ, Технические науки № 2, 2023, с. 6–19
12. Боряев Р.О., Чуваков А.В. Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук // Сборник материалов IX Международной научно-практической конференции, ТГУ, 2023, с. 407–412

© Чуваков Александр Владимирович (avch2105@gmail.com); Боряев Родион Олегович (r.boryaev@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНИК СПАЙДЕРИНГА И СКРАПИНГА ПРИ ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ ЗАЩИЩЕННОСТИ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЙ

USING SPIDERING AND SCRAPING TECHNIQUES IN ASSESSING THE SECURITY STATUS OF WEB APPLICATIONS

G. Shipulin
A. Priymak

Summary. The article discusses the purposes of using spidering and scraping techniques used as a means of collecting information about work, as well as the content of web application content. With the development of digitalization processes, the importance of the above techniques increases, since a significant proportion of incoming network traffic of web applications is generated by automated means. The article describes algorithms for the functioning of scraping and spidering techniques by extracting data from web applications and analyzing web application responses using automation software. Due to the wide variety of software solutions for spidering and scraping, their classification is proposed based on the types of software implementations, and methods and means that limit functionality and reduce the impact of scraper and spider programs on a web application are highlighted and generalized.

Keywords: spidering, crawling, scraping, web application, information security.

Шипулин Георгий Фаризович

кандидат юридических наук, доцент, Российский технологический университет (РТУ МИРЭА)
podumai_nad@mail.ru

Приймак Андрей Евгеньевич

Российский технологический университет (РТУ МИРЭА)
fndrex@bk.ru

Аннотация. В статье рассматриваются цели применения техник спайдеринга и скрапинга, используемых в качестве средств сбора информации о работе, а также содержимого контента веб-приложений. С развитием процессов цифровизации важность вышеперечисленных техник возрастает, поскольку значительная доля входящего сетевого трафика веб-приложений генерируется именно автоматизированными средствами. В статье описываются алгоритмы функционирования техник скрапинга и спайдеринга посредством извлечения данных из веб-приложений и анализа ответов веб-приложения с помощью программных средств автоматизации. Ввиду большого разнообразия программных решений спайдеринга и скрапинга предлагается их классификация на основе типов программных реализаций, а также выделяются и обобщаются способы и средства, ограничивающие функционал и снижающие влияние работы программ-скраперов и программ-спайдеров на веб-приложение.

Ключевые слова: спайдеринг, краулинг, скрапинг, веб-приложение, информационная безопасность.

Ввиду стремительной цифровизации общественных отношений, увеличения объема цифровой экономики и перехода к цифровому способу оказания услуг увеличивается количество веб-приложений и частота их использования. Рост компьютерных атак на веб-приложения и веб-ресурсы российских организаций и государственных учреждений за последние 2 года, так в 2022 г. согласно отчета компании Solar количество веб-атак составило 21.5 млн, а в 2023 г. количество инцидентов информационной безопасности, зафиксированных web application firewall, составило около 750 млн, что свидетельствует об актуальности вопросов обеспечения информационной безопасности. [8,9]

Наиболее объективная оценка состояния защищенности веб-приложения может быть получена на основании результатов его тестирования на проникновение, что позволяет выявить имеющиеся уязвимости, а также разработать и реализовать конкретные меры по их закрытию, тем самым нивелировав угрозы. Первым этапом тестирования на проникновение является сбор

данных об исследуемой системе, в рамках которого одной из задач является определение и восстановление структуры веб-приложения посредством использования техник спайдеринга (spidering), а при сборе конкретной информации — скрапинга (scraping). Реализации вышеупомянутых технологий представляют собой, как правило, скрипты автоматизированного сканирования веб-ресурсов с синтаксическим анализом кода веб-страниц.

Каждое веб-приложение или веб-сайт представляет собой структуру каталогов и файлов на уровне файловой системы сервера, которые в свою очередь имеют свой функционал и цели применения.

Для обхода структуры веб-приложения выполняется анализ HTML-страницы и выявление содержащихся в ней ссылок, которые могут быть как локальными, т.е. указывающими на локальные ресурсы, так и внешними — на внешние ресурсы. [10]

Поскольку большинство сайтов представляют собой древовидную структуру связанных гиперссылками страниц, у которой корнем является стартовая страница сайта, процесс спайдеринга начинается, как правило с нее. Ссылки, выявленные на этой странице, добавляются в очередь на посещение, после чего этот процесс повторяется, начиная с первого объекта из очереди. Далее возможно произведение последовательного углубления по первой обнаруженной ссылке, таким образом выстраивается карта веб-сайта.

Спайдеринг — это техника определения структуры веб-сайта и составления карты веб-приложения соответственно, и заключается в обходе структуры веб-приложения (сайта) для сбора данных и определении карты сайта. [5]

Краулинг как техника схожа со спайдерингом, однако ее основной целью является обнаружение и поиск новых или обновленных веб-страниц для дальнейшей их индексации и формирования к выдаче при поисковом запросе. Существует множество поисковых роботов поисковых систем, например, Googlebot является поисковым роботом поисковой системы Google, Yandex Bot — робот, созданный специально для поисковой системы Яндекс и др. [4]

Если же в данном контексте происходит сбор конкретной (определенной) информации, то техника называется скрапинг (или скрэпинг) (scraping). Преимуществами использования вышеперечисленных техник в контексте анализа защищенности веб-приложения помимо восстановления структуры является определение форм ввода данных, версии CMS (Content Management System), файлов с чувствительными данными и др.

Скрапинг (или скрэпинг) представляет собой технику сбора конкретной информации с веб-ресурса по заданной выборке. Как правило, при этом предполагается агрегация найденных данных.

Сам процесс скрапинга заключается в анализе запрошенной веб-страницы посредством сканирования на предмет наличия искомых сущностей веб-страницы, заданных до запуска самого процесса. Из найденных сущностей извлекаются их значения (тест — почтовые адреса, контактные телефоны, гиперссылки и пр., файлы — изображения, документы и пр.), т.е. происходит обращение к ним посредством соответствующего HTTP-запроса и выгрузка. Поиск данных также может осуществляться рекурсивно по всем страницам исследуемого веб-ресурса.

Существует множество программных реализаций краулинга и скрапинга в виде отдельных библиотек и фреймворков, а также готовых скриптов, написанных,

как правило, на интерпретируемых языках программирования, и отдельных модулей программных средств. [2]

В качестве примера библиотеки и фреймворка можно отнести фреймворк Scrapy, разработанный на языке программирования Python, включающий разные механизмы обхода веб-ресурсов, функции обработки запросов, анализа и представления собранных данных и библиотеку BeautifulSoup, разработанную также на языке программирования Python, позволяющую производить анализ HTML и XML-кода. [7]

Примером модуля спайдеринга в составе программного средства является модуль Spider программного обеспечения Burp Suite. [1]

Одной из самых простых и распространенных консольных утилит, позволяющих осуществить как спайдеринг, так и скрапинг, является утилита wget, поддерживающая функцию рекурсивной обработки до трех уровней в глубину от заданного url-адреса. Другой реализацией скрапинга является утилита с графическим интерфейсом Easy Web Extract. [6]

Обе технологии оставляют цифровые следы в журналах событий веб-сервера, в частности, работа спайдеров может быть выявлена по значению User-Agent в заголовке запроса к веб-приложению, поскольку у многих спайдеров значения заголовков User-Agent уникальны.

Таким образом, одним из способов блокировки их работы является блокирование запросов на основе выявления в теле HTTP-запроса заголовков с конкретными значениями. Например, через конфигурационный файл .htaccess веб-сервера Apache2 (с установленным модулем mod_rewrite) можно задать директивы, ограничивающие вывод ответа веб-сервера на соответствующий запрос при наличии в его заголовках определенных значений. [11]

Работу программ-скрэперов тяжелее выявить и заблокировать, поскольку частота их запросов в разы меньше, чем у спайдеров, также возможна динамическое изменение ip-адресов источника запросов. Выявление работы спайдеров осуществляется посредством анализа запросов к веб-приложению из журнала событий, поскольку спайдер находит только сущности, к которым есть ссылки на текущей веб-странице, что в свою очередь является недостатком данной технологии в целом, поскольку спайдер как программа не найдет страницы, на которые нет ссылок.

Однако поиск «скрытых», неиндексированных директорий можно осуществить посредством их перебора, что в свою очередь оставляет еще более выраженный цифровой след в журналах событий веб-сервера ввиду

большого количества однотипных запросов с изменяемым значением конечной части url-адреса.

Другим средством ограничения работы «легитимных» спайдеров (ботов сборщиков), таким как поисковые боты GoogleBot и пр., является задание содержимого файла robots.txt, представляющее собой условный список исключений, то есть ограничений доступа к указанным директориям и файлам сайта, как правило, служебным, со стороны ботов-сборщиков. Основная цель его применения — снижение риска перегрузки запросами веб-ресурса, месторасположение файла robots.txt — корневая директория сайта.

Считают, что использование технологии CAPTCHA ключевых страницах может значительно затруднить автоматизированный сбор данных, однако системы искусственного интеллекта способны обходить CAPTCHA.

Другим средством защиты веб-приложений является внедрение WAF-решений, которые отслеживают входящий и исходящий HTTP-трафик и блокируют подозрительные соединения на основе заданных правил срабатывания. Одним из наиболее популярных решений WAF является модуль mod_security, используемый для веб-серверов Apache2 и Nginx.

Стоит также отметить эффективность такой меры, как подключение веб-приложения к инфраструктуре Cloudflare, которая предоставляет следующие возможности:

- защита от DDoS-атак;
- предупреждение веб-атак;
- блокирование работы ботов-сборщиков (спайдеров) и краулеров;
- и др. [3]

Таким образом, были описаны алгоритмы работы технологии спайдеринга, заключающейся в рекурсивном обходе веб-приложения как древовидной структуры, и технологии скрапинга, заключающейся в извлечении искомой информации из сущностей запрошенной веб-страницы. Помимо этого, были выделены и сгруппированы реализации вышеуказанных техник по способу реализации: отдельные библиотеки и фреймворки, скрипты, модули программных средств. Обобщены и описаны основные средства защиты от применения программ спайдеров и скрэперов: задание конфигураций файла robots.txt, веб-сервера, использование WAF-решений, CAPTCHA-технологии, подключение к инфраструктуре Cloudflare.

ЛИТЕРАТУРА

1. Medium: The Power of Burp Spider for Automated Website Mapping in Web Application Security // Medium платформа для социальной журналистики. URL: <https://medium.com/@nahklizaf/the-power-of-burp-spider-for-automated-website-mapping-in-web-application-security-e2a0ec410d9> (дата обращения: 06.09.2024).
2. Habr: Веб-скрейпинг: что это такое и зачем нужно // Habr платформа для публикаций технических статей. URL: <https://habr.com/ru/articles/323202> (дата обращения: 27.08.2024).
3. Habr: Обзор CDN-сервиса CloudFlare // URL: <https://habr.com/ru/articles/125823/> (дата обращения: 24.09.2024).
4. Google Developers: Googlebot — Руководство по сканированию и индексации // Google Developers платформа для разработчиков. URL: <https://developers.google.com/search/docs/crawling-indexing/googlebot?hl=ru> (дата обращения: 25.08.2024).
5. Stackademic Blog: What Is Web Crawler, Spider, and Scraping? // Stackademic блог об обучении и технологиях. URL: <https://blog.stackademic.com/what-is-web-crawler-spider-and-scraping-41986a011dab?gi=dfd3aec38e5f> (дата обращения: 23.08.2024).
6. Rayobyte: Using a Wget for Web Scraping // Rayobyte блог о прокси-сервисах и веб-технологиях. URL: <https://rayobyte.com/blog/wget-proxy/> (дата обращения: 10.09.2024).
7. Bright Data: Веб-скрейпинг с помощью Python // Bright Data — платформа для управления данными и их сбора из интернета. URL: <https://ru.brightdata.com/blog/how-to-scraper-with-python> (дата обращения: 01.09.2024).
8. Rt-solar: Отчеты об атаках на онлайн-ресурсы российских компаний за 2022 год // Rt-solar — архитектор комплексных систем кибербезопасности. URL: <https://rt-solar.ru/analytics/reports/3289/> (дата обращения: 10.08.2024).
9. Rt-solar: Отчеты об атаках на онлайн-ресурсы российских компаний за 2023 год // Rt-solar — архитектор комплексных систем кибербезопасности. URL: <https://rt-solar.ru/analytics/reports/4113/> (дата обращения: 10.08.2024).
10. Priceva: В чем разница между парсингом и скрейпингом? // Priceva — Блог о маркетинге, мониторинге цен и ценообразовании. URL: <https://priceva.ru/blog/article/v-chem-raznitsa-mezhdu-parsingom-i-skrejpingom> (дата обращения: 16.08.2024).
11. Nic: Файл .htaccess — настройка перенаправлений и управление конфигурацией веб-сервера. // Nic — официальный регистратор доменов. URL: https://www.nic.ru/help/fajl-htaccess-nastrojka-perenapravlenij-i-upravlenie-konfiguraciej-veb-servera_6793.html (дата обращения: 15.09.2024).

© Шипулин Георгий Фаризович (podumai_nad@mail.ru); Приймак Андрей Евгеньевич (fndrex@bk.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ГИПОКСИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА УЛЬТРАСТРУКТУРНУЮ ОРГАНИЗАЦИЮ КАРДИОМИОЦИТОВ

Арсакханова Гайна Абдуллоевна

Кандидат медицинских наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Чеченский государственный
университет им. А.А. Кадырова»
gistologiya58@mail.ru

THE EFFECT OF PROLONGED HYPOXIC EXPOSURE ON THE ULTRASTRUCTURAL ORGANIZATION OF CARDIOMYOCYTES

G. Arsakhanova

Summary. Relevance. Chronic hypoxia is a key factor in the development of a wide range of cardiovascular diseases, however, the ultrastructural foundations of cardioadaptation to oxygen deficiency remain poorly understood. *The aim of the work* is to identify the peculiarities of transformation of intracellular organelles of cardiomyocytes under prolonged hypoxic exposure. *Methods.* The study was conducted on 40 mongrel white male rats divided into control (n=20) and experimental (n=20) groups. Modeling of chronic hypoxia was carried out by keeping animals in conditions of hypobaric hypoxia (GBH) with an «ascent» to an altitude of 5000 m above sea level for 6 hours daily for 45 days. The left ventricular myocardium samples were examined by light and electron microscopy. *Results.* It has been established that chronic HBH induces a complex of compensatory and adaptive changes in cardiomyocytes: 1) an increase in the specific volume of mitochondria with an increase in the number and size of crysts; 2) hypertrophy and polymorphism of nuclei with a predominance of euchromatin; 3) the formation of an extensive network of sarcoplasmic reticulum and Golgi complex. *Discussion.* Prolonged adaptation to hypoxia activates intracellular mechanisms of energy production and protein synthesis in cardiomyocytes, which ensures the maintenance of contractile function in conditions of oxygen starvation. The obtained data deepen the understanding of the cellular and molecular foundations of cardioadaptation and open up prospects for the development of new approaches to the prevention and treatment of hypoxic myocardial conditions.

Keywords: hypoxia, ultrastructure, cardiomyocytes, adaptation, mitochondria, sarcoplasmic reticulum.

Аннотация. Актуальность. Хроническая гипоксия является ключевым фактором развития широкого спектра сердечно-сосудистых заболеваний, однако ультраструктурные основы кардиоадаптации к дефициту кислорода остаются малоизученными. *Цель работы* — выявить особенности трансформации внутриклеточных органелл кардиомиоцитов при длительном гипоксическом воздействии. *Методы.* Исследование проведено на 40 беспородных белых крысах-самцах, разделенных на контрольную (n=20) и экспериментальную (n=20) группы. Моделирование хронической гипоксии осуществлялось путем содержания животных в условиях гипобарической гипоксии (ГБГ) с «подъемом» на высоту 5000 м над уровнем моря по 6 ч ежедневно в течение 45 суток. Образцы миокарда левого желудочка исследовали методами световой и электронной микроскопии. *Результаты.* Установлено, что хроническая ГБГ индуцирует комплекс компенсаторно-приспособительных изменений кардиомиоцитов: 1) нарастание удельного объема митохондрий с увеличением числа и размеров крист; 2) гипертрофию и полиморфизм ядер с преобладанием эухроматина; 3) формирование разветвленной сети саркоплазматического ретикула и комплекса Гольджи. *Обсуждение.* Длительная адаптация к гипоксии активирует внутриклеточные механизмы энергопродукции и протеинсинтеза в кардиомиоцитах, что обеспечивает поддержание сократительной функции в условиях кислородного голодания. Полученные данные углубляют представления о клеточно-молекулярных основах кардиоадаптации и открывают перспективы для разработки новых подходов к профилактике и лечению гипоксических состояний миокарда.

Ключевые слова: гипоксия, ультраструктура, кардиомиоциты, адаптация, митохондрии, саркоплазматический ретикулум.

Введение

Проблема адаптации организма к гипоксии является одной из фундаментальных в современной биомедицине [5, с. 27]. Хроническая гипоксия лежит в основе патогенеза таких социально значимых заболеваний, как ишемическая болезнь сердца, хроническая сердечная недостаточность, легочная гипертензия [2, с. 42; 7, с. 197]. В то же время феномен адаптации к высокогорью демонстрирует уникальные приспособительные возможности организма в условиях сниженного парциального давления кислорода [3, с. 79]. Ключевую

роль в развитии как гипоксических повреждений, так и компенсаторных реакций играет миокард, что обусловлено его чрезвычайно высокой чувствительностью к недостатку O_2 [9, с. 7]. Однако тонкие клеточные механизмы кардиоадаптации к гипоксии во многом остаются неясными.

Известно, что хроническое гипоксическое воздействие индуцирует каскад метаболических и сигнальных событий в кардиомиоцитах, включая активацию HIF-1-зависимых путей, оптимизацию функции дыхательной цепи, подавление апоптоза, стимуляцию ангиогенеза

[12, с. 35]. На органном уровне эти процессы реализуются в повышении коронарного резерва, нарастании массы миокарда, улучшении сократимости [8, с. 99]. Вместе с тем ультраструктурные основы формирования гипоксически устойчивого фенотипа кардиомиоцитов остаются малоизученными. Имеются отдельные указания на гипертрофию митохондрий, пролиферацию саркоплазматического ретикулума, уплотнение ядерного хроматина при адаптации к высокогорью [1, с. 175; 6]. Однако эти данные фрагментарны и требуют комплексного анализа.

Цель настоящего исследования — выявить особенности трансформации ультраструктурной организации кардиомиоцитов при экспериментальном моделировании хронической гипоксии.

В соответствии с поставленной целью были сформулированы следующие задачи:

1. Разработать модель длительного гипоксического воздействия, адекватно имитирующую условия высокогорья.
2. Изучить динамику изменений митохондриального аппарата кардиомиоцитов при хронической гипоксии.
3. Охарактеризовать трансформацию ядерного компартмента кардиомиоцитов в процессе гипоксической адаптации.
4. Проследить перестройки саркоплазматического ретикулума и комплекса Гольджи кардиомиоцитов в ответ на длительный дефицит кислорода.

Материалы и методы

Эксперименты проведены на 40 беспородных половозрелых крысах-самцах с начальной массой 180–200 г. Животные были разделены на 2 группы: контрольную (n=20) и подвергавшуюся воздействию хронической гипобарической гипоксии (ГБГ) (n=20). Моделирование ГБГ осуществляли путем ежедневного 6-часового пребывания крыс в условиях разрежения атмосферы, что соответствовало подъему на высоту 5000 м над уровнем моря (pO₂=84 мм рт. ст.). Длительность гипоксического воздействия составила 45 суток. Контрольных животных содержали в стандартных условиях вивария при свободном доступе к воде и пище.

По окончании эксперимента крыс выводили из опыта декапитацией под эфирным наркозом. Образцы миокарда иссекали из средней трети свободной стенки левого желудочка и фиксировали в 10 % растворе нейтрального формалина и 2,5 % глютаральдегида на фосфатном буфере (pH=7,4). Гистологические срезы окрашивали гематоксилином и эозином и по Ван-Гизону. Для электронной микроскопии образцы дофиксировали в 1 % растворе четырехоксида осмия, обезвоживали в спиртах возрас-

тающей концентрации и заключали в эпоксидную смолу Эпон-812. Ультратонкие срезы контрастировали уранилацетатом и цитратом свинца по Рейнольдсу и изучали в электронном микроскопе ПЭМ-125К.

На электронограммах подсчитывали объемные плотности (Vv) митохондрий, миофибрилл, саркоплазматического ретикулума, ядер и цитоплазмы. Замеры линейных размеров и подсчет численных плотностей (Na) производили не менее чем на 100 функционально активных кардиомиоцитах. Анализ осуществлялся в программах Image-Pro Plus (Media Cybernetics) и Excel.

Достоверность межгрупповых различий оценивали с помощью t-критерия Стьюдента. Критический уровень значимости принимали равным 0,05.

Результаты исследования

Ультраструктурный анализ кардиомиоцитов выявил выраженные адаптивные перестройки внутриклеточных органелл в ответ на хроническое гипоксическое воздействие. Наиболее значимые изменения затрагивали митохондриальный аппарат, ядерный компартмент и систему саркоплазматического ретикулума (СПР).

В контрольной группе митохондрии располагались упорядоченно вдоль длинной оси кардиомиоцита, имели овальную или округлую форму и содержали умеренное число крист. Средний объем митохондрий составил 0,32±0,04 мкм³, а их объемная плотность (Vv) — 34,6±1,2 %. После 45-дневной ГБГ наблюдалось существенное увеличение размеров митохондрий (0,51±0,06 мкм³, p < 0,01) при неизменной численной плотности (Na). Vv митохондрий возрастала до 47,8±1,5 % (p < 0,001), что свидетельствует о суммарном нарастании их массы в цитоплазме кардиомиоцитов (табл. 1). Параллельно отмечалось усложнение внутренней архитектуры митохондрий за счет увеличения числа и плотности упаковки крист.

Таблица 1.

Количественные параметры ультраструктурной организации кардиомиоцитов при хроническом гипоксическом воздействии (M±m)

Параметр	Контроль (n=20)	Гипоксия (n=20)
Объем митохондрий (мкм ³)	0,32±0,04	0,51±0,06*
Vv митохондрий (%)	34,6±1,2	47,8±1,5**
Площадь ядра (мкм ²)	8,4±0,5	10,8±0,6*
Vv ядер (%)	3,8±0,3	4,2±0,4
Vv миофибрилл (%)	52,5±1,6	43,4±1,8*
Vv СПР (%)	2,8±0,3	4,4±0,4*

Примечание: * — p < 0,05, ** — p < 0,001 по сравнению с контролем.

Ядра интактных кардиомиоцитов характеризовались овальной формой, центральным расположением и преобладанием гетерохроматина над эухроматином. В опытной группе выявлена тенденция к полиморфизму ядер с появлением глубоких инвагинаций и фестончатости кариолеммы. На фоне умеренного увеличения средней площади ядерных профилей ($10,8 \pm 0,6$ мкм² против $8,4 \pm 0,5$ мкм² в контроле, $p < 0,05$), наблюдался сдвиг в сторону эухроматина, что косвенно указывает на активацию транскрипционных процессов [4, с. 12]. Объемная плотность ядер не претерпевала существенной динамики, оставаясь в пределах 3–4 %.

Система СПР в контрольных образцах была развита слабо и располагалась преимущественно вблизи межклеточных контактов. Под влиянием хронической гипоксии происходило расширение каналов СПР с формированием разветвленной сети, равномерно распределенной по саркоплазме. Vv саркотубулярной системы возрастала более чем в 1,5 раза (с $2,8 \pm 0,3$ % до $4,4 \pm 0,4$ %, $p < 0,01$), что согласуется с данными о гипертрофии СПР при адаптации к высокогорью [10, с.1305]. Комплекс Гольджи в опытной группе также подвергался умеренной гиперплазии, однако его объемная фракция оставалась на низком уровне (< 1 %).

Двухфакторный дисперсионный анализ подтвердил высокую статистическую значимость влияния хронической ГБГ на ультраструктурную реорганизацию кардиомиоцитов ($F=12,24$, $p < 0,001$). При этом наибольший вклад в развитие адаптивного ответа вносили сдвиги митохондриального компартмента ($\beta=0,42$, $p < 0,01$) и системы СПР ($\beta=0,31$, $p < 0,05$). Корреляционный анализ выявил положительную связь между Vv митохондрий и саркотубул ($r=0,64$, $p < 0,01$), что указывает на сопряженность пластических процессов в энергетическом и сократительном аппаратах кардиомиоцитов.

Таким образом, длительное гипоксическое воздействие индуцирует комплекс ультраструктурных сдвигов в кардиомиоцитах, направленных на оптимизацию продукции энергии, усиление синтеза белка и регуляцию ионного гомеостаза. Ключевым звеном формирования гипоксически толерантного фенотипа служит митохондриальный аппарат, претерпевающий направленную трансформацию в сторону увеличения мощности и эффективности работы. Гипертрофия митохондрий сопровождается нарастанием числа и плотности крист — основных генераторов АТФ за счет окислительного фосфорилирования [11, с. 260]. Мы полагаем, что эти изменения опосредованы активацией PGC-1 α -зависимого митохондриального биогенеза, запускаемого HIF-1 в ответ на гипоксию [13, с. 62].

Немаловажную роль в кардиоадаптации играет усиление белоксинтезирующей функции кардиомиоцитов,

о чем свидетельствуют выявленные нами изменения ядерного компартмента. Умеренная гипертрофия ядер с увеличением доли эухроматина характерна для метаболически активных клеток с высоким уровнем транскрипции [6]. Гиперплазия комплекса Гольджи, служащего ключевым центром «сборки» и посттрансляционной модификации протеинов, дополнительно указывает на интенсификацию биосинтетических процессов при хронической гипоксии. Эти данные созвучны результатам исследований, демонстрирующих нарастание экспрессии ряда, гипоксия-индуцибельных генов (VEGF, EPO, GLUT1) в кардиомиоцитах при адаптации к высокогорью [12, с. 69].

Зафиксированное нами расширение саркотубулярной сети отражает важную роль системы СПР в поддержании сократительной функции и Ca²⁺-гомеостаза кардиомиоцитов в условиях хронической гипоксии [9, с. 7]. Известно, что терминальные цистерны СПР служат основным резервуаром Ca²⁺, необходимого для электро-механического сопряжения [7, с. 201]. Гипертрофия СПР обеспечивает адекватное депонирование и освобождение ионов кальция, предотвращая диастолическую перегрузку саркоплазмы и сократительную дисфункцию. Не исключено, что эти ультраструктурные перестройки сопряжены с характерным для гипоксической адаптации сдвигом экспрессии Ca²⁺-транспортирующих белков в сторону «медленных» изоформ SERCA и RyR [8, с. 99].

В целом, полученные нами данные свидетельствуют о том, что хроническая гипоксия стимулирует формирование специфического гипоксически резистентного фенотипа кардиомиоцитов, обеспечивающего поддержание сократительной активности в условиях дефицита кислорода. Ключевые ультраструктурные признаки такой трансформации — гипертрофия митохондрий, пролиферация СПР, активация ядерно-ядрышкового аппарата. Эти адаптивные перестройки, по-видимому, универсальны и описаны у различных видов млекопитающих, хронически подвергающихся действию гипоксии — от лабораторных грызунов [1, с. 176; 5, с. 29] до человека [2, с. 42; 3, с. 90].

Мы полагаем, что в основе ультраструктурного ремоделирования кардиомиоцитов при хронической гипоксии лежит эпигенетическая модификация экспрессии генов, контролирующих митохондриальный биогенез, сопряжение возбуждения-сокращения, энергетический метаболизм. Ведущая роль в этих процессах принадлежит редокс-чувствительным транскрипционным факторам (HIF-1, NF- κ B), активируемым при снижении напряжения O₂ [14, с. 89]. Можно предположить, что эпигенетическая трансформация генома кардиомиоцитов носит стойкий характер и сохраняется даже после прекращения гипоксического воздействия. Это предположение требует экспериментальной проверки в модели

посткондиционирования — реоксигенации после длительного пребывания в условиях гипоксии.

Еще одним перспективным направлением будущих исследований представляется анализ возрастной динамики ультраструктурных изменений в миокарде при хронической гипоксии. Имеются указания, что адаптивный потенциал кардиомиоцитов снижается по мере старения организма, что может быть сопряжено с накоплением окислительных повреждений, нарушениями митохондриальной динамики, истощением пролиферативных резервов [15, с. 98]. Сравнительное изучение гипоксического ответа в онтогенетическом аспекте позволит глубже понять клеточные основы возрастной кардиальной патологии.

Основные ограничения нашей работы связаны с использованием единственной модели хронической гипоксии (ГБГ), что не позволяет экстраполировать полученные результаты на другие гипоксические состояния (например, нормобарическую или прерывистую гипоксию). Кроме того, мы анализировали ультраструктуру миокарда только на «пике» адаптации (45-е сутки), тогда как динамика субклеточных сдвигов на более ранних этапах осталась неисследованной.

Для детального картирования траектории формирования гипоксического фенотипа кардиомиоцитов необходимы дальнейшие исследования с варьированием режимов гипоксического воздействия и отбором проб в разные временные точки. Параллельный анализ функциональных показателей сердечной деятельности (ЭКГ, эхокардиография) позволил бы сопоставить ультраструктурные характеристики с уровнем сократительной активности миокарда. Применение современных молекулярно-биологических подходов (ПЦР, вестерн-блоттинг, протеомный анализ) даст ценную информацию о метаболических и сигнальных механизмах, опосредующих гипоксический ответ.

Резюмируя вышеизложенное, можно заключить, что хроническая гипоксия вызывает направленную ультраструктурную реорганизацию кардиомиоцитов, затрагивающую митохондрии, СПР и ядерный аппарат. Эти адаптивные перестройки нацелены на оптимизацию энергопродукции, усиление биосинтетических процессов и поддержание Ca^{2+} -гомеостаза, что в конечном итоге обеспечивает сохранение сократительной функции миокарда при дефиците O_2 . Дальнейшие исследования субклеточных и молекулярных механизмов гипоксической адаптации позволят разработать новые эффективные подходы к профилактике и терапии широкого спектра кардиоваскулярных заболеваний, связанных с недостатком кислорода.

Для более глубокого понимания динамики ультраструктурных перестроек при адаптации к хронической

гипоксии мы провели сравнительный анализ морфометрических параметров кардиомиоцитов на разных сроках ГБГ. Помимо 45-х суток, анализировали образцы миокарда, полученные на 15-е и 30-е сутки гипоксического воздействия.

Обнаружено, что первые признаки ремоделирования кардиомиоцитов появляются уже на 15-й день эксперимента. В этот период отмечалось увеличение объемной плотности митохондрий (Vv) до $39,2 \pm 1,4$ % по сравнению с контролем ($34,6 \pm 1,2$ %, $p < 0,05$). На 30-й день Vv митохондрий возрастала до $44,6 \pm 1,6$ % ($p < 0,01$) и на 45-й достигала $47,8 \pm 1,5$ % ($p < 0,001$). Таким образом, митохондриальная гиперплазия носила прогрессирующий характер с максимальным приростом на поздних этапах адаптации.

Сходную динамику демонстрировало расширение саркотубулярной сети. Vv саркоплазматического ретикулума на 15-й день составляла $3,2 \pm 0,3$ %, на 30-й — $3,8 \pm 0,4$ % ($p < 0,05$), на 45-й — $4,4 \pm 0,4$ % ($p < 0,01$). Это указывает на постепенное развитие адаптивных изменений СПР в процессе гипоксического воздействия.

Отличительной особенностью динамики ядерного компартмента было отсутствие значимых сдвигов на ранних сроках (15 и 30 суток) с последующим умеренным увеличением площади ядер (с $8,4 \pm 0,5$ до $10,8 \pm 0,6$ μm^2 , $p < 0,05$) к 45 дню ГБГ. Очевидно, что активация транскрипционных процессов — более позднее событие формирования гипоксически толерантного фенотипа кардиомиоцитов в сравнении с энергетическим ремоделированием.

Корреляционный анализ подтвердил наличие тесной связи между продолжительностью ГБГ и ключевыми ультраструктурными параметрами кардиомиоцитов. Коэффициент корреляции Спирмена (rs) между временем гипоксии и Vv митохондрий составил $0,78$ ($p < 0,001$), между временем гипоксии и Vv СПР — $0,69$ ($p < 0,01$). Это демонстрирует ведущую роль длительности гипоксического стимула в запуске и прогрессировании внутриклеточных адаптивных перестроек.

Полученные данные о динамике ультраструктурных изменений кардиомиоцитов при хронической гипоксии дополняют и расширяют представления о клеточных механизмах формирования устойчивого к недостатку кислорода фенотипа миокарда. Они показывают, что митохондриальное ремоделирование и трансформация СПР — относительно ранние события адаптации, тогда как перестройки ядерного аппарата включаются позднее. Дальнейшие исследования молекулярных триггеров и эффекторов этих процессов позволят глубже понять иерархию и взаимодействие компенсаторно-приспособительных реакций кардиомиоцитов при длительном гипоксическом стрессе.

Заключение

Резюмируя вышеизложенное, можно заключить, что хроническая гипоксия индуцирует комплекс ультраструктурных изменений кардиомиоцитов, ключевыми из которых являются: 1) гиперплазия и гипертрофия митохондрий с увеличением числа крист; 2) расширение саркоплазматического ретикулума; 3) трансформация ядерного компартмента с нарастанием доли эухроматина. Эти адаптивные перестройки формируются последовательно, носят прогрессирующий характер и направлены на оптимизацию энергопродукции, активацию биосинтетических процессов, поддержание ионного гомеостаза. Их интегральным результатом служит повышение устойчивости сократительного аппарата сердца к дефициту кислорода. Полученные данные углубляют фундаментальные представления о клеточных и субклеточных основах гипоксической адаптации миокарда. Они дополняют и расширяют имеющиеся в литературе сведения о динамике ультраструктурного ремоделирования кардиомиоцитов при хроническом гипоксическом стрессе, позволяют по-новому взглянуть на иерархию и взаимодействие компенсаторно-приспособительных реакций. Выявленные закономерности имеют важное теоретическое значение для понимания общебиологических механизмов адаптации к гипоксии и могут служить концептуальной основой для разработки новых подходов к повышению неспецифической резистентности организма.

Практическая значимость исследования определяется тем, что его результаты открывают перспективы

для создания инновационных кардиопротективных технологий, основанных на направленной коррекции внутриклеточных процессов в кардиомиоцитах. Фармакологическое таргетирование митохондрий, системы энергообеспечения, кальциевого обмена представляется оправданной стратегией повышения устойчивости миокарда к ишемии и профилактики сердечной недостаточности. Полученные данные о характере и динамике ультраструктурных перестроек могут быть использованы как морфологические критерии для тестирования эффективности кардиопротекторных средств в доклинических исследованиях.

Не менее важными представляются и прикладные аспекты работы, связанные с разработкой новых подходов к гипоксическому прекондиционированию — немедикаментозному способу повышения толерантности сердца к ишемии. Результаты исследования демонстрируют, что направленность и выраженность компенсаторных ультраструктурных сдвигов зависит от продолжительности гипоксического воздействия. Это открывает возможность оптимизации существующих протоколов интервальных гипоксических тренировок для достижения максимального кардиопротективного эффекта.

Таким образом, проведенное исследование не только вносит весомый вклад в фундаментальную науку, углубляя представления о клеточных механизмах гипоксической адаптации, но и закладывает основу для разработки прикладных биомедицинских технологий, нацеленных на профилактику и лечение ишемической патологии сердца.

ЛИТЕРАТУРА

1. Заднипряный И.В. Морфологический субстрат вторичной митохондриальной дисфункции при транзиторной ишемии миокарда у крысят /И.В. Заднипряный, О.С. Третьякова, Т.П. Сатаева //Таврич. мед.-биол. вестн. — 2013. — Т. 16, № 3, Ч. 1(63). — С. 174–178.
2. Казначеева К.С. Механизмы развития цитокининдуцированного апоптоза /Казначеева К.С. //Гематол. и трансфуз. — 2001. — Т. 44, № 1. — С. 40–43.
3. Капелько В.И. Внеклеточный матрикс миокарда и его изменения при заболеваниях сердца /Капелько В.И. //Кардиология. — 2005. -Т. 40, № 9. — С. 78–90.
4. Москалева Е.Ю. Возможные механизмы адаптации клетки к повреждениям, индуцирующим программированную гибель. Связь с патологий /Москалева Е.Ю., Северин С.Е. //Патол. физиол. и эксперим. терапия. — 2006. — № 2. — С. 2–15.
5. Cochran A., Morriss S.E., Edelman L.S., Saf-fle J.R. Burn patient characteristics and outcomes following resuscitation with albumin. *Burns*. 2007; 33: 25–30. doi: 10.1016/J.BURNS.2006.10.005
6. Dries D. Management of burn injuries — recent developments in resuscitation, infection control and outcomes research. *Scand. J. Trauma Resusc. Emerg. Med.* 2009; 17: 14. doi: 10.1186/1757–7241-17-14
7. Elkin S.R., Lakoduk A.M., Schmid S.L. Endo-cytic pathways and endosomal trafficking: a primer. *Wien. Med. Wochenschr.* 2016; 166 (7–8): 196–204. doi: 10.1007/s10354-016-0432-7
8. Escher F, Pietsch H, Aleshcheva G, Bock T, Baumeier C, Elsaesser A et al. Detection of viral SARS-CoV-2 genomes and histopathological changes in endomyocardial biopsies. *ESC Heart Failure*. 2020;7(5):2440–7. DOI: 10.1002/ehf2.12805
9. Kogan E.A., Berezovskiy Yu.S., Blagova O.V., Kukleva A.D., Bogacheva G.A., Kurilina E.V. et al. Myocarditis in Patients with COVID-19 Confirmed by Immunohistochemical. *Kardiologija*. 2020;60(7):4–10. [Russian: Коган Е.А., Березовский Ю.С., Благова О.В., Куклева А.Д., Богачева Г.А., Курилина Э.В. и др. Миокардит у пациентов с COVID-19, подтвержденный результатами иммуногистохимического исследования. *Кардиология*. 2020;60(7):4–10]. DOI: 10.18087/cardio.2020.7. n1209
10. Parkar N.S., Akpa B.S., Nitsche L.C., Wedge-wood L.E., Place A.T., Sverdlow M.S., Chaga O., Minshall R.D. Vesicle formation and endocytosis: function, machinery, mechanisms, and modeling. *Antioxid. Redox Signal*. 2009; 11 (6): 1301–1312. doi: 10.1089/ars.2008.2397
11. Pham T.N., Cancio L.C., Gibran N.S., American Burn Association. American Burn Association practice guidelines: burn shock resuscitation. *J. Burn Care Res.* 2008; 29 (1): 257–266. doi: 10.1097/BCR.0b013e31815f3876

12. Pietsch H, Escher F, Aleshcheva G, Baumeier C, Morawietz L, Elsaesser A et al. Proof of SARS-CoV-2 genomes in endomyocardial biopsy with latency after acute infection. *International Journal of Infectious Diseases*. 2021; 102:70-2. DOI: 10.1016/j.ijid.2020.10.012
13. Sohn J., Brick R.M., Tuan R.S. From embryonic development to human diseases: the functional role of caveolae/caveolin. *Birth Defects Res. C. Embryo. Today*. 2016; 108 (1): 45–64. doi: 10.1002/bdrc.21121
14. Tavazzi G, Pellegrini C, Maurelli M, Belliato M, Sciutti F, Bottazzi A et al. Myocardial localization of Coronavirus in COVID-19 cardiogenic shock. *European Journal of Heart Failure*. 2020;22(5):911-5. DOI: 10.1002/ejhf.1828
15. Wenzel P, Kopp S, Göbel S, Jansen T, Geyer M, Hahn F et al. Evidence of SARS-CoV-2 mRNA in endomyocardial biopsies of patients with clinically suspected myocarditis tested negative for COVID-19 in nasopharyngeal swab. *Cardiovascular Research*. 2020;116(10):1661-3. DOI: 10.1093/cvr/cvaa160.

© Арсаханова Гайна Абдулловна (gistologiya58@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ОСОБЕННОСТИ ПЕРФУЗИИ СЛИЗИСТОЙ ПРИ АТРОФИЧЕСКОМ КОЛИТЕ НЕАНГИОГЕННОЙ ПРИРОДЫ

FEATURES OF MUCOSA PERFUSION IN ATROPHIC COLITIS OF NON- ANGIOGENIC NATURE

**I. Barkhatov
N. Barkhatova
E. Barkhatova**

Summary. The article presents the results of comparative studies of microcirculation and perfusion parameters of the colon mucosa in verified atrophic non-angiogenic colitis, subclinical form of low-grade colitis and in the absence of colon pathology. As the results of the work showed, the use of endoscopic laser Doppler flowmetry, along with morphological verification of pathology, makes it possible to differentiate secondary trophic disorders and nonspecific inflammatory changes in the mucous membrane of a non-angiogenic nature, which is important for determining the tactics of patient management and choosing the optimal components of complex treatment.

Keywords: atrophic colitis, colopathy, endoscopic laser doppler flowmetry.

Бархатов Игорь Викторович

кандидат медицинских наук, заведующий отделением,
ГАУЗ «Областная клиническая больница №3» г. Челябинск
ig3489032@yandex.ru

Бархатова Наталья Анатольевна

доктор медицинских наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный
медицинский университет»
barhatova.2020@mail.ru

Бархатова Екатерина Игоревна

ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный
медицинский университет»
barhatova_katya_75@mail.ru

Аннотация. В статье приведены результаты сравнительных исследований показателей микроциркуляции и перфузии слизистой толстой кишки при верифицированном атрофическом неангиогенном колите, субклинической форме колита низкой степени активности и в отсутствие патологии толстой кишки. Как показали результаты работы, применение методики эндоскопической лазерной доплеровской флоуметрии наряду с морфологической верификацией патологии позволяет дифференцировать вторичные трофические расстройства и неспецифические воспалительные изменения слизистой не ангиогенной природы, что имеет важное значение для определения тактики ведения больных и выбора оптимальных компонентов комплексного лечения.

Ключевые слова: атрофический колит, колопатия, эндоскопическая лазерная доплеровская флоуметрия.

В настоящее время отмечается рост частоты встречаемости воспалительных заболеваний кишечника. Одним из частых патологических состояний является хронический колит, частота встречаемости которого достигает 10–14 до 48 случаев на 100 тыс. населения [2, 6, 8]. В практике гастроэнтеролога особое место занимает морфологически верифицированный атрофический колит, который может быть исходом и проявлением не только местных воспалительных и аутоиммунных процессов, но и результатом хронической абдоминальной ишемии на фоне генерализованного атеросклероза или иной патологии висцеральных сосудов [5, 7]. При этом своевременная дифференциальная диагностика этиопатогенетического варианта колита влияет на тактику ведения больных и результаты лечения.

Клиническая дифференциальная диагностика колитов базируется на данных анамнеза, особенностях симптоматики, но ведущим диагностическим критерием считают морфологическое исследование биоптатов слизистой толстой кишки. Важно отметить, что большинство хронических колитов сопровождаются постепенным

переходом стадии острого или подострого воспаления в стадию хронического воспаления с нарушениями регенераторных процессов, приводящих к субатрофии и атрофии слизистой [3]. В таких клинических ситуациях, определяемые при эндоскопическом исследовании признаки атрофического колита, подтверждаются при биопсии, но редко позволяют точно определить причину развития заболевания, что не позволяет в полной мере использовать патогенетическое лечение [1].

В основе процессов дистрофии, субатрофии и атрофии, как правило, лежит нарушение микроциркуляции и питания тканей кишечной стенки, вызванные бактериальным агентом, аллергеном, аутоиммунным процессом, токсическим воздействием, избыточным развитием соединительной ткани, отложением коллагена или иными факторами [2, 3, 4]. Нередко атрофическим изменениям в кишечнике сопутствует синдром хронической абдоминальной боли, в основе которого возможно и воспаление, и нарушения кровоснабжения органов. В дифференциальной диагностике патологии используют ультразвуковую доплерографию, магнитно-резо-

нансную или компьютерную томографию, исследование микроциркуляции слизистой [5, 7, 9]. Это определяет актуальность исследований, направленных на поиск диагностических критериев патологии толстой кишки на уровне висцерального кровоснабжения и состояния микроциркуляции.

Цель исследования — провести сравнительную оценку состояния микроциркуляции слизистой толстой кишки при атрофическом колите с персистирующим абдоминальным болевым синдромом и субклинического варианта хронического колита низкой степени активности.

Материалы и методы исследования

Проведён анализ результатов обследования 61 пациента с клиникой морфологически верифицированного хронического атрофического колита неангиогенной природы, сочетающегося с персистирующим абдоминальным болевым синдромом, сохраняющимся более 3 месяцев (группа АК). В группу сравнения были включены 26 больных, у которых при полном отсутствии субъективной клиники и изменений слизистой в ходе колоноскопии при поисковой биопсии отмечали признаки хронического колита низкой степени активности, что было расценено как проявление субклинический поверхностный колит (группа ПК). Для оценки степени и характера изменений микроциркуляции в слизистой оболочке толстой кишки при разных вариантах колита на начальном этапе исследований была сформирована группа из 18 пациентов, у которых при колоноскопии с биопсией отсутствовали признаки патологии толстой кишки, что было расценено, как вариант нормы (группа Н). Поводом для проведения фиброколоноскопии с поисковой биопсией в группе с вариантом нормы и с колитом низкой степени активности было обследование перед плановым оперативным вмешательством по поводу свищей прямой кишки, хронического геморроя или ректоцеле.

Комплексное обследование всех больных включало: клинические, лабораторные и эндоскопические исследования толстой кишки, ультразвуковое исследование органов брюшной полости, дуплексное сканирование непарных ветвей брюшной аорты (чревного ствола и мезентериальных артерий) для исключения патологии висцерального кровоснабжения. Выраженность клинической картины хронического колита анализировали с помощью шкалы оценки желудочно-кишечных симптомов (опросник качества жизни GSRS), а интенсивность персистирующего болевого синдрома определяли с помощью визуально-аналоговой шкалы.

При первичном сравнении во всех трёх группах преобладали женщины, составляя от 18,7 % (Н) — 19,3 % (ПвК) до 38,4 % (АтК) больных ($p > 0,05$). Средний возраст

больных в группах не имел достоверных отличий и составил $54,3 \pm 1,4$ (ВН), $56,8 \pm 1,2$ (ПвК) и $55,7 \pm 0,9$ (АтК) года ($p > 0,05$).

По данным проведённого УЗДГ у всех, включённых в исследование пациентов не было отмечено патологии непарных висцеральных артерий. С целью оценки перфузии и оксигенации слизистой использовали аппарат лазерной доплеровской флоуметрии и оксиметрии «ЛАКК-М» (НПП «ЛАЗМА»). Методика эндоскопического исследования микроциркуляции слизистой толстой кишки была использована на завершающем этапе диагностической фиброколоноскопии. При этом производили исследование показателей микроциркуляции слизистой в правой половине толстой кишки (купол слепой кишки, восходящая кишка, печёночный угол), кровоснабжаемой верхней брыжеечной артерией, и левой половины толстой кишки (селезёночный угол, нисходящая ободочная кишка, средние отделы сигмовидной кишки и ректосигмоидный отдел), получающий кровоснабжение по системе нижней брыжеечной артерии. Показатели микроциркуляции и оксигенации регистрировали в ходе экспозиции зонда на поверхности слизистой в исследуемых точках не менее 1–1,5 минут (патент РФ №2471428, 10.01.2013). Среди показателей микроциркуляции слизистой оценивали: показатель микроциркуляции (М п.е.), квадратическое отклонение (σ п.е.), объёмное кровенаполнение сосудов (V_r %), уровень кислородной сатурации (SO_2 %), коэффициент вариации (K_v %), индекс перфузионной сатурации кислорода в крови (S_m , %/п.е.), удельное потребление кислорода тканями (U, у.е), внутрисосудистое сопротивление (ВСС) и индекс эффективности микроциркуляции (ИЭМ). В ходе исследований особое внимание было уделено состоянию регуляторных систем микроциркуляции основанное на вейвлет-анализе частот колебаний микрососудистого русла. В ходе анализа полученных данных оценивали лидирующее влияние на перфузию слизистой миогенного (L), дыхательного (H) и кардиального (C) компонентов регуляции.

При статистическом анализе полученных данных использовали непараметрический метод с расчётом критерия Крускала-Уоллиса и хи-квадрата. Уровень значимости различий показателей был принят менее 0,05.

Результаты исследований

При первичной оценке параметров перфузии слизистой толстой кишки без патологических отклонений ряд показателей микроциркуляции в правых отделах толстой кишки бы выше, чем в левых. При этом в группе пациентов с морфологически верифицированным колитом низкой степени активности уровень показателей микроциркуляции не имел достоверного отличия от варианта нормы (табл. 1).

Таблица 1.

Показатели микроциркуляции слизистой толстой кишки

Показатели	Норма (n=18)		Поверхностный колит (n=26)		Атрофический колит (n=61)	
	пр. 1/2	лев. 1/2	пр. 1/2	лев. 1/2	пр. 1/2	лев. 1/2
M (п.е.)	11,6±0,3	9,3±0,4°	11,2±0,7	9,8±0,1	17,7±0,8*	15,3±0,8*
σ (п.е.)	4,3±0,2	3,3±0,4°	4,1±0,5	3,1±0,1	3,8±0,1*	1,6±0,3*
K _v (%)	37,5±0,7	36,5±0,4	40,7±0,9	32,3±0,8	21,5±0,3*	9,6±0,2*
V _i (%)	23,5±1,3	16,5±0,9°	22,7±1,4	16,1±0,5	31,7±1,2*	21,3±1,1*
SO ₂ (%)	87±1,9	82±1,3	86,2±1,1	81±1,4	80,3±1,9*	78,4±
U (y.e)	0,8±0,1	1,1±0,2	0,7±0,1	1±0,1	0,6±0,01*	1±0,06*

Примечание: * — p < 0,05 — достоверное отличие показателей в группах, ° — p < 0,05 — отличие показателей в правых и левых отделах толстой кишки в норме.

В отличие от этого при верифицированной для атрофии слизистой толстой кишки был характерен рост показателя микроциркуляции и объёмного кровенаполнения тканей, а также снижение флакса, коэффициента вариации, кислородной сатурации тканей и удельного потребления кислорода. Полученные результаты характеризуют застойный тип перфузии слизистой толстой кишки. Это в свою очередь объясняет выявленные трофические нарушения, как результат хронической гипоксии и снижения метаболизма в стенке кишки и вторичные воспалительные проявления.

В ходе оценки состояния регуляторных систем микроциркуляции по результатам вейвлет анализа частот колебаний микрососудов при отсутствии патологии слизистой и поверхностном колите были получены достоверно сходные данные (рис. 1).

И в норме, и при поверхностном колите отмечали преобладание миогенного компонента регуляции перфузии, а вклад дыхательного и кардиального компонентов был менее значимым. В отличие от этого при атро-

фическом колите наблюдали снижение роли миогенной (L) регуляции, при одновременном существенном росте пассивного дыхательного (H) компонента. Кардиальный фактор регуляции перфузии не имел достоверных отличий от нормы и оказывал минимальное влияние на уровень перфузии слизистой.

Для повышения уровня достоверности полученных данных ЛДФ-метрии на этапе анализа использовали нормированные показатели микроциркуляции и регуляторных систем. Данные результаты совпали с ранее выявленными. При отсутствии патологии и поверхностном колите лидировал миогенный (L₁) компонент регуляции перфузии, а среди пассивных механизмов кардиальный (C₂) компонент был более весомым, чем дыхательный (H₃) (табл. 2).

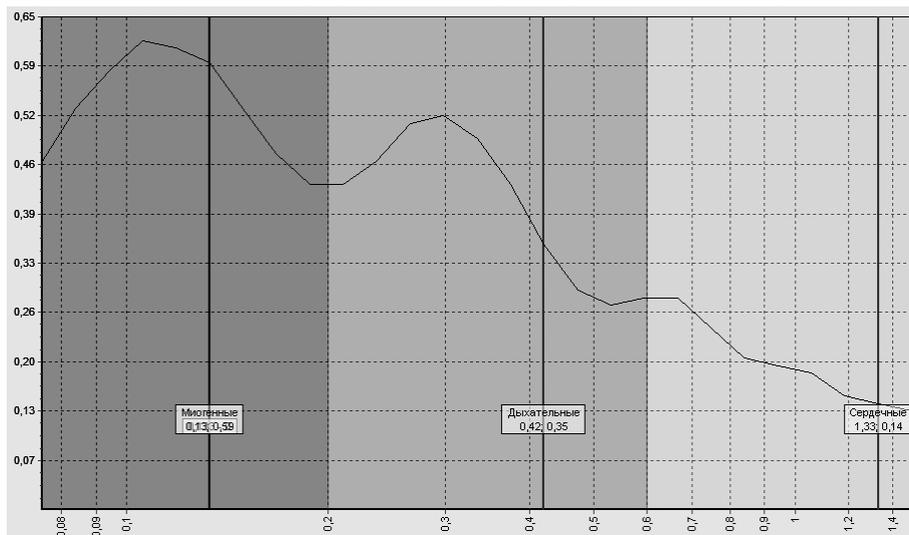
При атрофии слизистой миогенная регуляция (L) сохраняла первостепенное значение, но дыхательный компонент (H) становился соизмеримым с влиянием активного фактора, а кардиальный компонент регуляции превышал уровень влияния в норме в 2–7 раз. Получен-

Таблица 2.

Нормированные показатели ЛДФ слизистой толстой кишки

Показатели	Вариант нормы (n=18)		Субклинический колит (n=26)		Атрофический колит (n=61)	
	пр. 1/2	лев. 1/2	пр. 1/2	лев. 1/2	пр. 1/2	лев. 1/2
L/σ (%)	55±9¹	31±8,3¹	52±8¹	42±7¹	160±10^{1*}	175±6^{1*}
H/σ (%)	26,2±4 ³	9,2±1,7 ³	26±3 ³	16±3,3 ³	154±3^{2*}	138±3^{2*}
C/σ (%)	31±4²	16±2,9²	31±5²	26±4²	87±4 ^{3*}	119±3 ^{3*}
BCC (y.e.)	0,12±0,03	0,08±0,02	0,12±0,03	0,08±0,04	0,2±0,01*	0,1±
ИЭМ (y.e.)	0,96±0,02	0,92±0,04	0,92±0,04	0,97±0,01	0,7±	0,7±0,02*

Примечание * — p < 0,05 — достоверное отличие показателей в группах, жирным шрифтом выделены два ведущих механизма регуляции микроциркуляции.

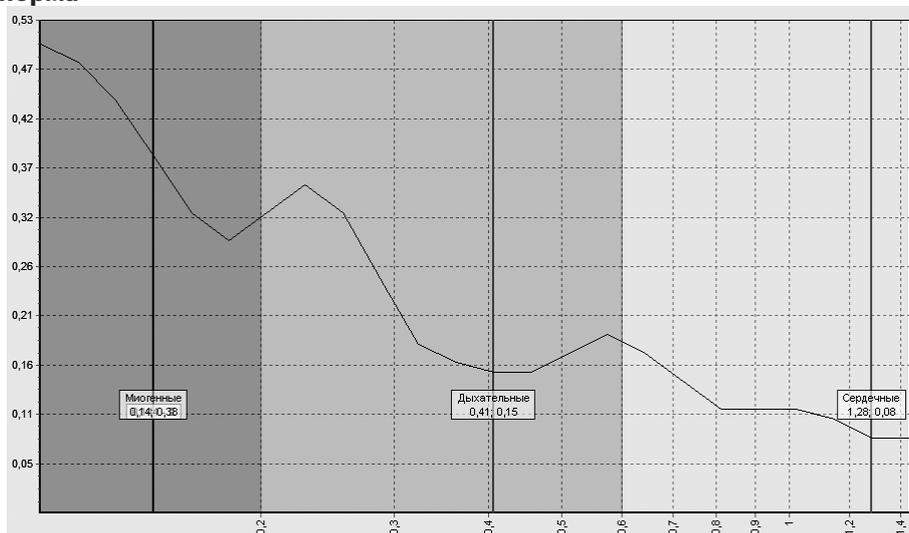


L_миогенный

Н_дыхательный

С_кардиальный

Толстая кишка — норма

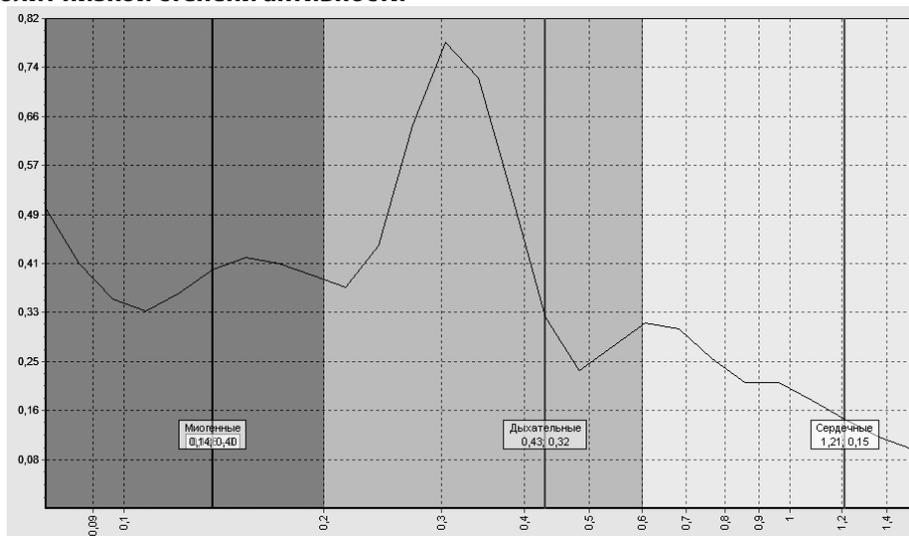


L_миогенный

Н_дыхательный

С_кардиальный

Поверхностный колит низкой степени активности



L_миогенный

Н_дыхательный

С_кардиальный

Атрофический неангиодиспластический колит

Рис. 1. Варианты вейвлет-анализа ЛДФ-грамм толстой кишки

ные результаты объясняют наличие выявленных признаков застоя крови в слизистой при атрофическом колите за счёт снижения тонуса микрососудов, и сохранения колебаний кровотока за счёт сокращений сердца и функции дыхания. Эти изменения могут быть не столько причиной нарушения трофики слизистой, как её следствием на поздних этапах развития той или иной патологии. Выявленные отклонения показателей перфузии слизистой и её регуляции можно использовать как компонент эндоскопического исследования для дифференциальной диагностики процессов атрофии, ишемии и воспаления.

Заключение

Применение современных методов морфологической и функциональной объективизации состояния микроциркуляции и перфузии тканей позволяет улучшить дифференциальную диагностику различных форм и клинических вариантов колитов и функциональных

нарушений толстой кишки. При сопутствующем синдроме хронической абдоминальной боли исследование состояния кровотока слизистой помогает в ранней диагностике наличия и варианта регуляторных нарушений перфузии, что определяет необходимые компоненты лечения. Результаты исследования показали, что гистологически верифицированный субклинический поверхностный колит не имеет достоверных отклонений регуляции и уровня перфузии слизистой от нормы. В то же время для атрофии слизистой неангиогенной природы характерны признаки микроциркуляторного застоя ($AK=M^{\uparrow}-\sigma_{\downarrow}-Kv_{\downarrow}-Vr^{\uparrow}-SO_{2\downarrow}-Sm_{\downarrow}-U_{\downarrow}$) с ростом влияния пассивного дыхательного механизма в регуляцию перфузии ($BK=ALF_1-ANF_2-ACF_3$). Эндоскопическая ЛДФ-метрия при колитах позволяет объективизировать морфологическую картину патологии, уточнить характер дисрегуляции кровотока слизистой, подобрать оптимальные компоненты терапии и оценить её эффект в динамике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Атлас эндоскопии пищеварительного тракта / Под ред. Дж. Коэна — М.: Логосфера, 2012. 360 с.
2. Гаязова А.Ф., Семенова К.А., Нагибин С.И. Структура и клиническая характеристика хронических заболеваний толстой кишки в практике участкового врача-терапевта // Медицинская наука и образование Урала. 2020. Т. 21. № 1 (101). С. 122–124.
3. Ивашкин В.Т., Шептулин А.А., Шифрин О.С. Микроскопический колит: клинические формы, диагностика, лечение // РЖГГК. 2006. № 6. С. 56–61.
4. Козлов В.И. Развитие системы микроциркуляции. М.: Издательство РУДН, 2012. 346 с.
5. Лазебник Л.Б., Звенигородская Л.А. Хроническая ишемическая болезнь органов пищеварения. М.: Анахарсис, 2003. 287 с.
6. Практическая гастроэнтерология: руководство для врачей: В 2 ч. Ч.1 / И.В. Козлова, А.Л. Пахомова. М.: Дрофа, 2010. 479 с.
7. Сухаруков А.С., Нарезкин Д.В., Безалтынных А.А. Клинико-лабораторная и эндоскопическая диагностика хронического ишемического колита // Актуальные проблемы медицины. 2022. Т. 45. № 4. С. 400–412.
8. Barta Z., Toth L., Szabo G.G. Collagenous colitis: constipation or diarrhea? // Gut. 2003. Vol. 52. P. 1230–1238.
9. Hoff D.A.L., Gregersen H., Hatlebakk J.G. Mucosal blood flow measurements using laser Doppler perfusion monitoring // World J. Gastroenterol 2009. V15(2). P. 198–203.

© Бархатов Игорь Викторович (ig3489032@yandex.ru); Бархатова Наталия Анатольевна (barhatova.2020@mail.ru);
 Бархатова Екатерина Игоревна (barhatova_katya_75@mail.ru)
 Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ПСИХИКА БОЛЬНЫХ, СТРАДАЮЩИХ ХРОНИЧЕСКИМ БРОНХИТОМ

THE PSYCHE OF PATIENTS SUFFERING FROM CHRONIC BRONCHITIS

**E. Gracheva
V. Strauss
V. Grachev**

Summary. A study of the psyche of patients with chronic bronchitis of 34 people, aged 26–37 years, suffering from this disease for 3 or more years, revealed a high level of neuroticism, emotional lability, anxiety, irritability, which may indicate the presence of These patients have neurasthenia, which can lead to exacerbation of the underlying disease, which are an obstacle to the formation and construction of socially adequate forms of interaction with objective reality. All this creates conditions for disruption in the development of the patient's personality. A modern approach to these disorders requires a comprehensive examination of patients using, in addition to drug treatment, various methods of psychotherapeutic rehabilitation.

Keywords: psyche, psychosomatics, chronic bronchitis, neurosis, neurasthenia, psychoemotional state of personality.

Грачева Екатерина Петровна

доцент, кандидат биологических наук,

Владимирский государственный университет

Штраус Вероника Александровна

кандидат психологических наук,

директор, АНО ДПО «УЦ «Синтез»

Грачев Владимир Анатольевич

врач-ординатор, Приволжский исследовательский

медицинский Университет, Владимирский филиал

robot@sibac.info

Аннотация. Исследование психики больных хроническим бронхитом 34 человек, в возрасте 26–37 лет, страдающих данным заболеванием от 3 и более лет, выявило высокий уровень невротизации, эмоциональной лабильности, тревожности, раздражительности, что может свидетельствовать о наличии у данных пациентов невротизации, которая может приводить к обострению основного заболевания, являющегося препятствием на пути формирования и построения социально адекватных форм взаимодействия с объективной реальностью. Все это создает условия для нарушения в развитии личности больного. Современный подход к этим нарушениям требует комплексного обследования пациентов с использованием помимо медикаментозного лечения различных методов психотерапевтической реабилитации.

Ключевые слова: психика, психосоматика, хронический бронхит, невроз, невротизация, психоэмоциональное состояние личности.

Введение

Изучение психики больных соматическими заболеваниями, влияние ее на течение болезни, является основной задачей психосоматики (7).

Болезнь — это всегда и повреждение систем организма, влекущее нарушение целостности, жизнедеятельности организма, и психическое страдание, переживание (3). Субъективное отношение к болезни зависит от многих конституциональных и индивидуально-психологических факторов: типа нервной системы и темперамента, характера, профессии, пола, возраста, личностных особенностей человека. Наличие соматического заболевания влияет на психическое состояние человека, отношение к себе и окружающему миру, межличностное общение (5,8).

Взаимосвязь психосоматики и соматопсихики — основной принцип лечения конкретного заболевания (1,8).

«Инструментом» оценки и анализа единства и своеобразных отличий таких сложных понятий, как здоровье, болезнь, личность, межличностные отношения, является концепция психологии отношений личности В.Н. Мясищева (7). Отношение в данной концепции представле-

но как универсальное интегрирующее понятие, которое проявляется при рассмотрении уровней развития и направленности личности, ее трудовой деятельности, патологии и психотерапевтических методов лечения психогенных и соматических расстройств. Данная концепция разработана ученым в трех основных планах: нейрофизиологическом, биопсихологическом и клиническом, что явилось основой для патогенетического понимания неврозов — психогенная реакция организма на соматическое заболевание (6).

В клинике неврозов известны вегетативные реакции организма: изменения частоты и объема дыхания, артериального давления, скорости кровотока и т.д. Акт вдоха может задерживаться так, что наступает вздох — и «горестный», а выдох при этом укорачивается. Такие функциональные нарушения дыхания могут отягощать течение основного заболевания (2).

В связи с вышесказанным, целью настоящего исследования является изучение психики больных, страдающих хроническим бронхитом.

Гипотеза данной работы состоит в предположении о том, что у взрослых пациентов с диагнозом хрони-

ческий бронхит возможны отклонения в психоэмоциональной сфере, а именно: возбудимость, раздражительность, тревожность, которые являются пусковым механизмом в развитии неврозов.

В соответствии с целью и гипотезой, выбраны следующие эмпирические методы и методики исследования:

1. Метод наблюдения, включенное (4)
2. Экспресс-диагностика невротических состояний, тест-опросник Хека-Хесса (9)
3. Уровень невротизации личности, тест-опросник Л.И. Вассермана (9)
4. Изучение качественных модальных эмоциональных особенностей Л.А. Рабиновича (4)
5. Изучение психоэмоциональной устойчивости и уровня саморегуляции с помощью прибора активациометра проф. Ю.А. Цагарелли (10).

В рамках исследования проведен качественный и количественный анализ результатов испытуемых.

Исследование проводилось на базе ГБУЗ ВО «Городская поликлиника №1 г. Владимира» в течение 2023 года. В нем приняли участие мужчины и женщины с диагнозом хронический бронхит в количестве 34 человек, болеющих от 3 и более лет, в возрасте от 26 до 37 лет.

Результаты исследования

Экспресс-диагностика невротических состояний по тест опроснику Хека-Хесса выявила у 28 больных (82,3 %) достаточно большое количество утвердительных ответов: 26–27 из 40 вопросов, что свидетельствует о высокой вероятности невроза.

Изучение уровня невротизации по тест-опроснику Л.И. Вассермана выявил следующее: у 30 больных (88,2 %) сумма всех положительных ответов составляла 32–35 из 40. Это говорит о высоком уровне невротизации, эмоциональной лабильности, тревожности, раздражительности, трудностях в общении (2,9).

Полученные результаты подтверждают данные экспресс-диагностики невроза.

Результаты эксперимента, полученные с помощью методики Л.А. Рабинович, указывают на то, что у 27 пациентов (81,0 %) ярко выражены в поведении и деятельности эмоции модальности «Гнев» и «Страх», и слабо — эмоция модальности «Радость». Это, на наш взгляд, указывает на эмоциональную неустойчивость, неспособность выдерживать эмоциональные нагрузки, склонность больных к пессимистичности и негативному функциональному фону.

Данные, полученные с помощью активациометра проф. Ю.А. Цагарелли, позволили охарактеризовать

психоэмоциональное состояние пациентов, страдающих хроническим бронхитом. Показатели психоэмоциональной устойчивости и низкий уровень саморегуляции у 29 больных (84,8 %) указывают на чрезмерное возбуждение, неспособность правильно выполнять даже несложные действия, что приводит к снижению успешности и результативности выполняемой деятельности, ухудшению состояния здоровья, которое может проявляться симптоматикой обострения заболевания.

Наблюдения в ходе эксперимента выявило у 5 пациентов в острой фазе заболевания необходимость часто и глубоко дышать, что характерно для невротического дыхательного синдрома, Функциональное нарушение дыхания приводило к полипноэ: дыхание становилось либо поверхностным с частыми вздохами, либо с приступами гипервентиляции, при котором грудное дыхание преобладает, а диафрагмальное отсутствует. Гипервентиляция сопровождалась тревогой и мучительными страхами. Фобии больные в основном связывали с возможностью перехода своего заболевания в более тяжелое — бронхиальную астму. Переживания страха и тревоги у наших больных связаны с чрезмерной перегрузкой организма хроническим заболеванием, а также, возможно, невротическими изменениями личности.

Таким образом, анализ результатов психодиагностики пациентов, страдающих хроническим бронхитом, свидетельствует о высоком уровне невротизации, выраженной эмоциональной неустойчивости, раздражительности, фиксации на соматических ощущениях. Все это сопровождается симптоматикой неврастения, вегетативными расстройствами: одышкой, сердцебиением с перебоями, повышением или понижением артериального давления, потливостью, похолоданием рук, ног и др.

Неврастения может продолжаться многие годы. У больных быстро происходит переход от повышенной возбудимости к слабости, возникает так называемая «раздражительная слабость». Установлено, при отсутствии лечения более 5 лет, возможно невротическое развитие личности (2). Неврастения «входит» в структуру личности, и тогда она неизбежно ведет к частым обострениям основного заболевания.

Заключение

Выделенные особенности психики, психоэмоционального состояния взрослых пациентов, страдающих хроническим бронхитом, на наш взгляд, являются препятствием на пути формирования эффективных способов построения социально адекватных форм взаимодействия с объективной действительностью. Психика данных больных создает условия для появления ряда нарушений в структуре личности, а также является пу-

сковым механизмом в развитии невроза, в частности неврастении с тревогами и страхами, формированием фобии.

Таким образом выдвинутая в начале исследования гипотеза, полностью подтвердилась.

Больные хроническим бронхитом нуждаются в психологическом сопровождении. Необходим современ-

ный подход к комплексному обследованию пациентов, использование различных методов психотерапевтической реабилитации — традиционных и нетрадиционных, дыхательной терапии, аутотренинга и др.

Необходимо также уделить большое внимание профилактики и лечению неврастении у больных хроническим бронхитом. В противном случае она осложняет течение основного заболевания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александр Ф. Психосоматическая медицина. Принципы и практическое применение. — М.: Канон+, 2022. — 352 с.
2. Батаршев А.В. Психология индивидуальных различий от темперамента к характеру и типологии личности. — Москва: Владос, 2001. — 255 с.
3. Волков В.Т., Стрелис А.К., Караваева Е.В., Тетенев Ф.Ф. Личность пациента и болезнь. — Томск: Госинститут, 1995. — 328 с.
4. Малкина-Пых И.Г. Психосоматика: Справочник практического психолога. — М.: Литрес, 2022. — 3020 с.
5. Менделевич В.Д. Клиническая медицинская психология. — М.: МЕДпресс-информ, 2005. — 426 с.
6. Мясищев В.Н. Личность и неврозы. — Л.: ЛГУ, 1960. — 230 с.
7. Мясищев В.Н. Психология отношений. — Воронеж: МОДЭК, 2011. — 398 с.
8. Психосоматические заболевания. Полный справочник. Под ред. Член-корр. РАЕ и РЭА Ю.Ю. Елисеева. — Москва: Эксмо, 2003. — 566 с.
9. Райгородский Д.Я. Практическая психодиагностика. — Самара: Бахрах, 1999— 672 с.
10. Цагарелли Ю.А. Системная диагностика человека и развитие психических функций. — Казань: Акцептор, 2009. — 412 с.

© Грачева Екатерина Петровна; Штраус Вероника Александровна; Грачев Владимир Анатольевич (robot@sibac.info)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

АНАЛИЗ ОБРАЗЦОВ МИКРОБНОГО СОСТАВА ОБОДОЧНОЙ КИШКИ И СТУЛА У ПАЦИЕНТОВ С АДЕНОМАМИ И КОЛОРЕКТАЛЬНЫМ РАКОМ

Карасев Иван Александрович

Кандидат медицинских наук, доцент,
заведующий отделением,
НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина, г. Москва
Ronc-karasev@yandex.ru

ANALYSIS OF COLONIC AND STOOL MICROBIAL COMPOSITION SAMPLES FROM PATIENTS WITH ADENOMAS AND COLORECTAL CANCER

I. Karasev

Summary. The study presents an analysis of the colonic microbiome and stool microbiome in patients with adenomas and colorectal cancer. The microbiota is critical in the pathogenesis of sporadic colorectal cancer, as evidenced by the identification of certain microorganisms associated with different stages of precancerous lesions. The microbiome was investigated in correlation with the type, localization, and risk of malignization of neoplasms. The study methodology included 16S rRNA sequencing and data analysis using modern bioinformatics tools. The results demonstrate that the microbiome may be associated with the morphologic type and potential of neoplasms, which holds promise for the development of new methods for colorectal cancer diagnosis and prevention.

Keywords: colorectal cancer, intestinal microbiome, adenomas, malignization, sequencing.

Аннотация. В работе представлен анализ микробиома ободочной кишки и стула у пациентов с аденомами и колоректальным раком. Микробиота имеет критическое значение в патогенезе спорадического колоректального рака, что подтверждается выявлением определенных микроорганизмов, ассоциированных с различными стадиями предраковых образований. Микробиом исследован во взаимосвязи с типом, локализацией и риском малигнизации новообразований. Методология исследования включала секвенирование 16S рРНК и анализ данных с использованием современных биоинформатических инструментов. Результаты демонстрируют, что микробиом может быть связан с морфологическим типом и потенциалом новообразований, что открывает перспективы для разработки новых методов диагностики и профилактики колоректального рака.

Ключевые слова: колоректальный рак, микробиом кишечника, аденомы, малигнизация, секвенирование.

Введение

Колоректальный рак является одной из наиболее распространенных в настоящее время форм рака, занимая третье место по частоте среди мужчин и второе — среди женщин [1]. В случае колоректального рака, злокачественному образованию практически всегда предшествует доброкачественное предраковое образование — полип, которое может быть заблаговременно обнаружен при колоноскопии и удалено. Программы скрининга людей старше 50 лет, включающие колоноскопию, способствовали нисходящему тренду заболеваемости колоректальным раком в развитых странах начиная с 2000-х годов [2]. При этом наличие эпителиальных образований разной степени злокачественности является достаточно распространенным явлением, их выявляют у более половины индивидов старше 50 лет со средним риском колоректального рака. Однако не все они имеют одинаковый риск малигнизации. Данный риск зависит от размера, локализации, факторов риска, морфологического типа образования, а также динамики его роста [3]. При обнаружении эпителиального образования производится полипэктомия, эндоскопическая резекция слизистой оболочки, эндоскопическая резекция с дис-

секцией в подслизистом слое или рекомендуется наблюдение при воспалительном или гиперпластическом характере новообразования.

Согласно настоящему пониманию, малигнизация аденом может происходить двумя путями в зависимости от типа полипа: классический вариант аденома-аденокарцинома и по зубчатому пути. Ранее считалось, что у зубчатых аденом низкий риск малигнизации и единственным путем образования рака является малигнизация аденом. На данный момент известно, что существует альтернативный путь развития рака из зубчатых полипов, и он составляет 20–25 % от спорадического колоректального рака [4].

Последовательная малигнизация аденомы проходит стадию легкой дисплазии и развивается в аденокарциному [5]. При этом, первичной в подавляющем большинстве случаев является мутация в гене APC [6]. В норме APC отвечает за деградацию β-катенина, который является одним из основных участников внутриклеточного сигнального пути, который позволяет стволовым клеткам оставаться в нативном состоянии, и в норме активен в стволовых клетках кишечника в основании крипт,

и неактивен в дифференцированных клетках кишечника. Мутация гена APC приводит к длительной активации внутриклеточного сигнального пути и образованию гиперплазии [7]. Дальнейшее развитие опухоли сопровождается мутациями в гене супрессоре TP53, а также потерей гетерогенности [8–9].

Зубчатые образования включают в себя гиперпластические полипы (~75 %), сидячие зубчатые образования (SSL) (~25 %) и традиционные зубчатые аденомы (TSA) (<1 %) [10]. При этом два последних типа считаются предшественниками рака. Гиперпластические образования обычно не превышают в размерах 5 мм и не нарушают регулярность и структуру крипт, а расположены преимущественно в дистальных отделах кишечника. SSL характеризуются нарушением архитектуры крипты, размер составляет 5–7 мм, а располагаются они в проксимальных отделах кишечника. Значительно реже встречающиеся TSA обычно превышают в размерах SSL и имеют характерный вилезный исчерченный рисунок. Зубчатые образования обычно сидячие, что затрудняет их диагностику.

Считается, что механизм образования зубчатых полипов и их последующей малигнизации включает ряд последовательных мутаций. Первой из них является усиление функции BRAF-мутации, приводящей к обширному метилированию CpG островков, что в свою очередь приводит к блокировке различных генов, в том числе подавляющих опухолеобразование. Большая часть развившихся в результате этих процессов опухолей толстой кишки характеризуется микросателлитной нестабильностью (MSI). Появляющиеся в результате гиперметилирования мутации приводят к активации внутриклеточного сигнального пути, как и в случае последовательной малигнизации аденомы. Однако в отличие от последовательной малигнизации аденомы, где активация пути происходит за счет мутаций в гене APC (>90 %), в случае зубчатых образований обычно происходят мутации в RNF43-ZNRF3 комплексе. Описанный выше путь наиболее характерен для SSL образований. Для TSA образований первичной наряду с BRAF может быть и мутация KRAS, в этом случае гиперметилирования не происходит, а в развившемся раке не наблюдается MSI [11]. Интересно, что KRAS, являясь ключевым элементом альтернативного пути и активатором BRAF, демонстрирует различие в механизмах онкогенеза при этих двух мутациях [12]. При мутациях KRAS не наблюдается гиперметилирования CpG островков, микросателлитной нестабильности, и вследствие этого общее количество мутаций в образованиях, развивающихся по пути, аденома-карцинома, в среднем меньше, чем при зубчатом пути.

Кроме двух упомянутых выше путей существуют наследственные синдромы, приводящие к колоректальному раку, включающие герминальную мутацию в гене APC

(наследственный аденоматозный полипоз) и синдром Линча. Однако настоящая работа посвящена именно исследованию спорадического колоректального рака. Близнецовые исследования показали, что роль окружающей среды, преимущественно, особенности диеты, малоподвижный образ жизни, наличие кариозных зубов, гипопродукция соляной кислоты, преобладание в рационе красного мяса, превалируют над наследственными факторами в патогенезе спорадического колоректального рака [13]. В последнее время активно изучается роль микробиоты в развитии колоректального рака, в обиход введены термины «канцерогенный микробиом» и «орализация кишечного микробиома». Рассмотрим далее механизмы влияния микробиома на развитие рака ободочной и прямой кишки.

В настоящее время проведено множество исследований по сравнению кишечного микробиома людей с КРР и людей, не имеющих данного заболевания; мета-анализы и обзоры показывают, что ряд наиболее выраженных ассоциаций консистентен для разных популяций [14–15]. Ряд исследований включает в себя не только людей с развившимся раком, но и с начальными стадиями рака, что позволяет разделить микроорганизмы, ассоциированные с болезнью на так называемых «драйверов» (ассоциированных с ранними стадиями и предположительно каузальных) и «пассажира» [16]. Среди микроорганизмов, ассоциированных с ранними предраковыми образованиями, наблюдаются бактерии, типичные скорее для ротовой полости, чем для кишечника [17]. Исследования предраковых образований особенно важны, так как они могут пролить свет на неизвестные в настоящий момент механизмы влияния микробиоты на развитие CRC, а также предоставить информацию для разработки новых методов терапии и диагностики. Однако при этом остается малоисследованным микробиом предраковых образований с учетом их типа и локализации [18]. В настоящем исследовании мы проводим комплексный анализ микробиома первой российской когорты пациентов с предраковыми образованиями, используя образцы стула и биопсии. Цель исследования — выяснить, как микробиом отличается в новообразованиях различного типа, локализации и с разным риском малигнизации (который может быть оценен через размер полипа).

Материал и методы

Для эндоскопического исследования использовались видеокOLONоскопы EVIS EXERA III CF-H190,185,180 серии Olympus Co., EC-690 WM и EC-600WM (Fujifilm Co.). Хорошая подготовка определялась как оценка ≥ 6 по бостонской шкале. Время выведения эндоскопа определялось от слепой кишки до анального края, выражалось в секундах и рассчитывалось на колоноскопиях без патологических изменений.

В исследовании принимали участие 25 человек, каждый человек предоставил самостоятельно собранный образец стула. Образец биопсии получали при эндоскопическом исследовании при помощи стерильной цитологической щетки.

Все пациенты подписали информированное согласие об участии в исследовании.

Критерии включения/исключения

Исключения: антибиотики менее 3-х месяцев назад.

В ходе исследования была собрана следующая информация о пациентах:

- пол, возраст, индекс массы тела;
- статус курения;
- локализация образования;
- морфологическая характеристика образования;
- количество образований;
- размер образования;
- клиническая картина (наличие запоров, дегтеобразного стула, кровянистых выделений);
- анализ на наличие мутаций KRAS, NRAS and BRAF.

Пробоподготовка и секвенирование

Выделение ДНК из образцов кала проводилось с использованием набора Qiagen Power Fecal PRO в соответствии с инструкцией производителя. Амплификацию переменного участка V4 гена 16S рПНК проводили с использованием следующей системы праймеров: модификация 515 F (5'-GTGBCAGCMGCCGCGGTAA-3' [19] и Pro-mod-805 R (5'-GACTACNVGGGTTCTAATCC-3') [20]. Второй раунд амплификации проводился с использованием стандартных индексов Illumina с адаптерами. Оба раунда ПЦР проводились с использованием ПЦР буфера производства Евроген и амплификатора Bio-Rad CFX-96. Очистку ПЦР продуктов проводили с помощью набора для выделения ДНК реакционных смесей Cleanup Mini (Евроген). Концентрацию ДНК определяли с помощью флуориметра Qubit® (Invitrogen, США) с использованием набора Quant-iT™ dsDNA High-Sensitivity Assay Kit. Очищенные ампликоны смешивали эквимольно в соответствии с полученными концентрациями. Дальнейшая подготовка образца к секвенированию и секвенирование пулированной библиотеки осуществляли с использованием набора MiSeq Reagent Kit v2 (500 циклов) и прибора MiSeq (Illumina, США) согласно рекомендациям производителя. Первичная обработка (экстракция баркодов) была проведена как описано ранее [21]. После обрезания по баллу качества объединение ДНК-прочтений (ридов) проводилось с помощью пакета SeqPrep; итоговая длина ридов составила 252 пн.

Предобработка и первичный анализ данных

Для каждого образца было получено не менее 3000 ридов на образец. В процессе секвенирования совмест-

но с образцами каждой партии был отсекарован образец отрицательного контроля; риды, с высокой вероятностью соответствующие бактериям-контаминантам, найденные в отрицательном контроле, были удалены из файлов реальных образцов. Далее данные были проанализированы с помощью аналитической системы Кномикс-Биота (22); в том числе, были осуществлены: базовая фильтрация и оценка качества данных, профилирование таксономического состава, визуализация, сопоставление состава с метаданными. Кратко основные шаги анализа описаны ниже.

В процессе секвенирования совместно с образцами был отсекарован образец отрицательного контроля; риды, с высокой вероятностью соответствующие бактериям-контаминантам, найденные в отрицательном контроле, а также известные контаминанты были удалены из файлов реальных образцов (см. дополнительную таблицу 1). Сырые риды были предварительно обработаны с использованием программного пакета QIIME v2 [23]. В первую очередь была проведена фильтрация ридов с помощью алгоритма DADA2 [24] для получения представленности характерных последовательностей ASV (amplicon sequence variant). Далее проводилась таксономическая классификация этих последовательностей с использованием классификатора, реализованного в программном пакете QIIME2 [25] и обученного по базе SILVA v.138 [26], предварительно обработанной с помощью RESCRIPt [27]. Последовательности базы 16S были обрезаны в соответствии с использованными праймерами (515F/806R) и агрегированы с порогом сходства 99 %.

Полученные представленности характерных последовательностей были переданы в алгоритм PICRUSt2 [28], представленность метаболических путей и модулей оценивалась по базам KEGG [29] и MetaCyc [30].

Для анализа альфа разнообразия таблицы представленности на уровне родов были прорежены до 2700 ридов на образец. Альфа разнообразие было оценено по метрике Шеннона и Chao1. Таблицы представленности на уровнях вида, рода, семейства и т. д. были получены путем суммирования представленности характерных последовательностей, принадлежащих соответствующей таксономической группе. Расстояние между образцами было оценено на уровне бактериальных родов с использованием меры расстояния Айчитсона.

Статистический анализ данных

В связи с небольшим количеством образцов нами была проведена агрегация уровней для ряда параметров метаданных. В таблице 1 приведены исследованные параметры и уровни, по которым проводилась агрегация. Предположительный путь был определен на основе информации о мутациях, макроскопических характеристиках и гистологии.

Таблица 1.
 Параметры метаданных и агрегация значений параметров

Параметры	Категории до объединения (количество пациентов)	Категории после объединения (количество пациентов)
Локализация	Слепая кишка (2) Восходящая ободочная кишка (5) Поперечно-ободочная кишка (2)	Правые отделы (9)
	Нисходящая ободочная кишка (1) Сигмовидная кишка (12) Прямая кишка (2)	Левые отделы (15)
Макроскопическая характеристика	0-1s (18)	Сидячие (18)
	0-1p (2) 0-1sp (4)	на ножке/смешанный (6)
NICE категория	1 (7) 2 (15) 3 (2)	(7) (17)
Количество образований	1 (14) 2 (9) 5 (1)	(14) (10)
Размер образований	меньше, чем 5 мм (7) 6–9 мм (8)	меньше, чем 10 мм (15)
	10–14 мм (3) 15–19 мм (3) Больше 20 мм (3)	больше или равно 10 мм (9)
Гистология	Гиперпластический полип (5)	Полип (5)
	Сидячий зубчатый полип с дисплазией низкой степени выраженности (8) Аденома с дисплазией высокой степени (2) Аденома с дисплазией низкой степени (8) Высокодифференцированная аденокарцинома (1)	Аденома/Сидячий зубчатый полип/аденокарцинома (19)
Предполагаемый путь	Последовательность аденома-карцинома (12) Зубчатый (12)	
Kras-мутация	Да (8) Нет (16)	
Braf-мутация	Да (9) Нет (15)	
Nras-мутация *	Да (3) Нет (21)	

* — не был включен в анализ данных из-за небольшого числа случаев в одной из категорий

Поиск ассоциаций между составом микробиома, оцененным по стулу или биопсии и измеренными параметрами (см. табл. 1), проводился также на уровне бета разнообразия, альфа разнообразия, представленности отдельных таксонов, а также метаболических путей. Вклад параметров в вариацию состава сообщества оценивался по методу PERMANOVA с использованием расстояния Айчитсона (импутирование нулей производилось методом smultrepl). Связь между метаданными и разнообразием сообщества оценивалась с помощью линейной регрессии. Как для анализа альфа, так и бета разнообразия применялась поправка на множественное тестирование методом Бенджамини-Хохберга. Ассоциации с представленностью отдельных таксонов были проанализированы с помощью алгоритма selbal. Во внимание принимались результаты, показывающие воспроизводимость выше 50 % и AUC>0.7 для категориальных факторов или же воспроизводимость > 50 % и R2>0.2 для непрерывных факторов. Анализ проводился на таксономических уровнях от типа до вида.

Результаты и обсуждение

По результатам секвенирования для всех образцов было получено более 2700 видов после деноезинга [31]. В среднем различия между микробными сообществами, полученными методами биопсии и забора образца стула для одного индивида (расстояние Айчитсона 30.6 ± 3.94) были выше меж индивидиальных различий между образцами, собранными каждым методом в отдельности (для стула 25.2 ± 3.4 , для биопсии 22.7 ± 2.9) (рисунок {beta}, тест Манна-Уитни, $p < 0.05$).

Результаты оценки альфа-разнообразия для образцов, полученных с помощью биопсии и забора стула, зависели от выбранной метрики альфа-разнообразия. При использовании индекса Шеннона, позволяющего оценить богатство и ровность сообщества, наблюдалось повышенное разнообразие в образцах стула (парный тест Вилкоксона $p=0.0002$, рисунок {beta B, C}). При использовании же индекса chao1, представляющего собой оценку богатства сообщества, значимой зависимости не наблюдалось (рисунок {beta D, E}). Также в случае использования индекса chao1 внутрigrupповая вариация для образцов биопсии была выше, чем для образцов стула (тест Levene, $p=0.0914$).

Различия между двумя методами на уровне таксонов были также достаточно выражены. Мы проанализировали их с помощью алгоритма Selbal, а также метода поиска ближайшего баланса (NB) на уровне родов. Несмотря на то, что оба метода показали близкое к 1 значение AUC в результате кросс-валидации (0.86 ± 0.10 для selbal и 1.00 ± 0.00 для NB), воспроизводимость отдельных таксонов в балансах для Selbal не превышала 50 %. Это, вероятно, связано с тем, что высокая предсказательная

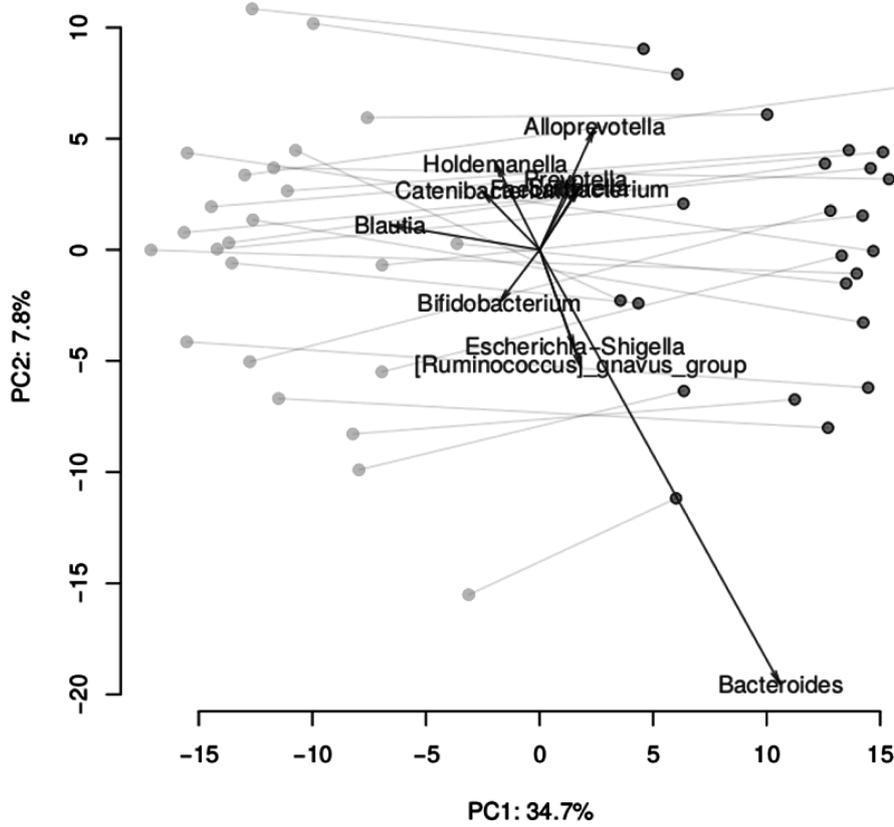


Рис. 1. Оценка Альфа разнообразия образцов стула

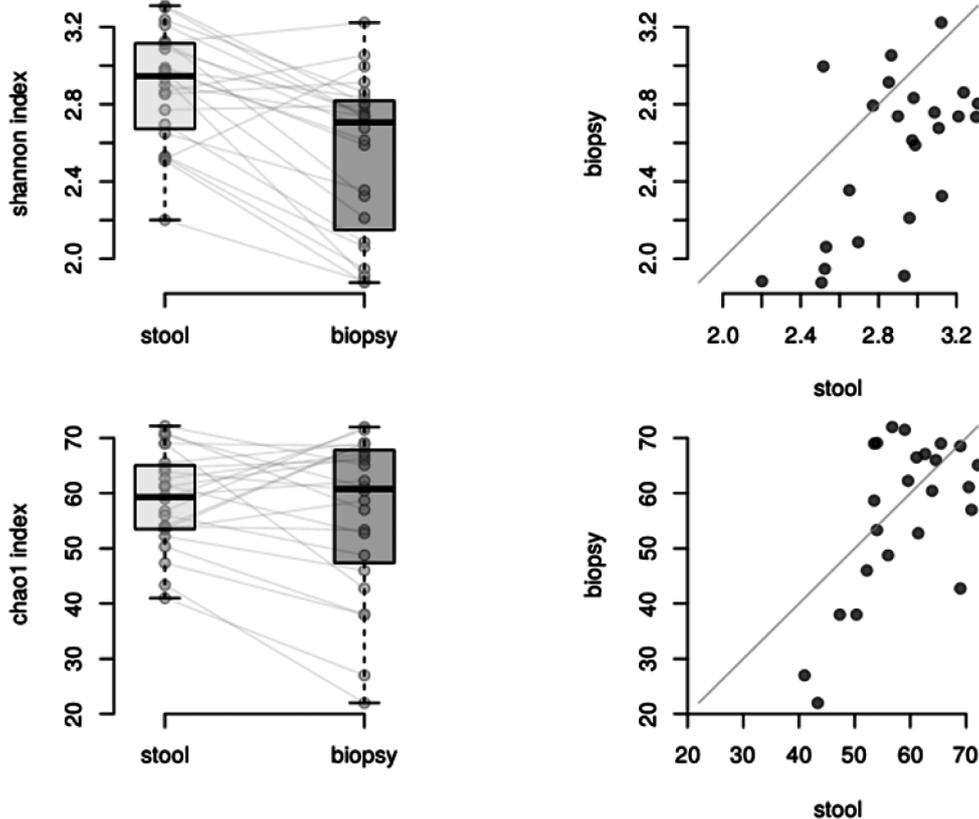


Рис. 2. Различия состава микробного сообщества между образцами стула и биопсии. Сравнение общего состава образцов методом PcoA (Principal Coordinates Analysis). В, С — Сравнение альфа-разнообразия образцов стула и биопсии по метрике Shannon. D, E — Сравнение альфа-разнообразия образцов стула и биопсии по метрике Chao1

сила достигалась уже при наличии двух таксонов в балансе, что и было выбрано алгоритмом как оптимальный размер баланса, в то время как ассоциированных таксонов было значительно больше. В методе NB не накладываются ограничения на размер баланса, с помощью данного метода было найдено 19 воспроизводимых таксонов (консистентно включенных более чем в 90 % балансов по результатам кросс-валидации), ассоциированных с образцами биопсии (числитель баланса) и 26 таксонов, ассоциированных с образцами стула (знаменатель баланса).

Интересно, что образцы биопсии характеризовались повышенной представленностью *Fusobacterium*. Также среди маркеров биопсии были некоторые бактерии, которые были больше похожи на контаминантов.

Зависимость между характеристиками образований и микробиомом

Наибольший процент объясненной вариации для образцов биопсии приходился на количество образований (1.4 %), наличие мутации в гене *Kras* (1.4 %) и локализацию (1.2 %); для стула — мутацию в гене *Braf* (1.2 %), балл по шкале NICE (1.1 %) и мутацию в гене *Kras* (1.1 %). Для альфа-разнообразия также не было найдено значимых ассоциаций.

Анализ на уровне со-представленных групп микроорганизмов в духе композиционного подхода также не выявил значимых ассоциаций.

Анализ на уровне балансов бактерий с помощью алгоритма *selbal* выявил несколько воспроизводимых (воспроизводимость > 70 %) ассоциаций, обладающих достаточно хорошей предсказательной силой ($AUC > 0.8$). Анализ был проведен на всех таксономических уровнях. Ассоциации были выявлены только для образцов биопсии:

- представленность [*Ruminococcus*] была ассоциирована с зубчатым путем канцерогенеза (воспроизводимость = 0.73, $AUC = 0.80 \pm 0.18$);
- представленность phylum *Fusobacteriota* была ассоциирована положительно с количеством образований (воспроизводимость = 0.90, $AUC = 0.81 \pm 0.17$);
- представленность phylum *Verrucomicrobiota* была ассоциирована положительно с количеством об-

разований (воспроизводимость = 0.77, $AUC = 0.81 \pm 0.17$).

Анализ методом ближайшего баланса не был проведен, так как не было выявлено значимых ассоциаций на уровне бета-разнообразия.

Анализ ассоциаций с помощью описанных выше методов выполнялся для таксонов с минимальной представленностью более 10 ридов более чем в 10 образцах. При этом многие таксоны, ранее ассоциированные с CRC, не прошли данный порог. В связи с этим мы проанализировали связь наличия таксонов, ранее ассоциированных с CRC, с исследуемыми характеристиками с помощью теста Фишера.

Среди данных таксонов были выделены: *Fusobacterium*, *Peptostreptococcus*, *Parvimonas*, *Solobacterium*, *Gemella*, *Atopobium*, *Actinomyces*, *Desulfovibrio*, *Phascolarctobacterium*, *Streptococcus*, *Bilophila*.

Заключение

Исследование продемонстрировало, что морфологический тип образования и его потенциал тесно коррелирует с кишечным микробиомом. По нашему мнению, необходимо селективно выделять группы риска на основании анамнеза, канцерогенности кишечного микробиома, факторов риска, включающих курение, злоупотребление алкоголем, малоподвижный образ жизни, атрофический гастрит 3–4 степени по OLGA/OLGIM, состояние после аппендэктомии, холецистэктомии и бариатрические операции со сроком давности более 20 лет, стоматиты, пародонтозы, кариозные зубы. Необходимо проведение скрининга колоректального рака данным группам риска с 45 лет; помимо этого, необходимо создание централизованного биобанка российской популяции пациентов и изучение возможности коррекции микробиома с целью профилактики рецидивов, мультицентрических форм рака толстой кишки. Данные были подтверждены независимо от наличия у этих лиц личного или семейного анамнеза полипов или рака. Анализ микробных ассоциаций у пациентов с колоректальным раком является новым направлением медицинской науки и видится крайне перспективным направлением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Siegel R.L., Miller K.D., Fuchs H.E., Jemal A. Cancer Statistics, 2021. *C.A. Cancer, J. Clin.* 2021 Jan;71(1):7–33. doi: 10.3322/caac.21654. Epub 2021 Jan 12. Erratum in: *C.A. Cancer, J. Clin.* 2021 Jul;71(4):359. doi: 10.3322/caac.21669. PMID: 33433946.
2. Sung H., Ferlay J., Siegel R.L., Laversanne M., Soerjomataram I., Jemal A., Bray F. Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries. *C.A. Cancer, J. Clin.* 2021 May;71(3):209–249. doi: 10.3322/caac.21660. Epub 2021 Feb 4. PMID: 33538338.
3. Pickhardt P.J., Pooler B.D., Kim D.H., Hassan C., Matkowskyj K.A., Halberg R.B. The Natural History of Colorectal Polyps: Overview of Predictive Static and Dynamic Features. *Gastroenterol Clin North Am.* 2018 Sep;47(3):515–536. doi: 10.1016/j.gtc.2018.04.004. Epub 2018 Jun 29. PMID: 30115435; PMCID: PMC6100796.

4. Liu C., Li Z., Ding J., Zhen H., Fang M. & Nie C. (2021). Species-level analysis of the human gut microbiome shows antibiotic resistance genes associated with colorectal cancer. *Frontiers in Microbiology*, 12, 765291.
5. Fearon E.R., & Vogelstein B. (1990). A genetic model for colorectal tumorigenesis. *Cell*, 61(5), 759–767.
6. Armaghany T., Wilson J.D., Chu Q., & Mills G. (2012). Genetic alterations in colorectal cancer. *Gastrointestinal cancer research: GCR*, 5(1), 19.
7. Armaghany T., Wilson J.D., Chu Q., & Mills G. (2012). Genetic alterations in colorectal cancer. *Gastrointestinal cancer research: GCR*, 5(1), 19.
8. Crockett S.D., & Nagtegaal D. (2019). Terminology, molecular features, epidemiology, and management of serrated colorectal neoplasia. *Gastroenterology*, 157(4), 949–966.
9. Szyllberg Ł., Janiczek M., Popiel A., & Marszałek A. (2015). Serrated polyps and their alternative pathway to the colorectal cancer: a systematic review. *Gastroenterology research and practice*, 2015(1), 573814.
10. Crockett S.D., & Nagtegaal D. (2019). Terminology, molecular features, epidemiology, and management of serrated colorectal neoplasia. *Gastroenterology*, 157(4), 949–966.
11. Morkel M., Riemer P., Bläker H., & Sers C. (2015). Similar but different: distinct roles for KRAS and BRAF oncogenes in colorectal cancer development and therapy resistance. *Oncotarget*, 6(25), 20785.
12. Morkel M., Riemer P., Bläker H., Sers C. Similar but different: distinct roles for KRAS and BRAF oncogenes in colorectal cancer development and therapy resistance. *Oncotarget*. 2015 Aug 28;6(25):20785–800. doi: 10.18632/oncotarget.4750. PMID: 26299805; PMCID: PMC4673229.
13. Hu H., Kang L., Zhang J., Wu Z., Wang H., Huang M., ... & Deng, Y. (2022). Neoadjuvant PD-1 blockade with toripalimab, with or without celecoxib, in mismatch repair-deficient or microsatellite instability-high, locally advanced, colorectal cancer (PICC): a single-centre, parallel-group, non-comparative, randomised, phase 2 trial. *The Lancet Gastroenterology & Hepatology*, 7(1), 38–48.
14. Wirbel J., Pyl P.T., Kartal E., Zych K., Kashani A., Milanese A., ... & Zeller, G. (2019). Meta-analysis of fecal metagenomes reveals global microbial signatures that are specific for colorectal cancer. *Nature medicine*, 25(4), 679–689.
15. Dai Z., Coker O.O., Nakatsu G., Wu W.K.K., Zhao L., Chen Z., Chan F.K.L., Kristiansen K., Sung J.J.Y., Wong S.H., Yu J. Multi-cohort analysis of colorectal cancer metagenome identified altered bacteria across populations and universal bacterial markers. *Microbiome*. 2018 Apr 11;6(1):70. doi: 10.1186/s40168-018-0451-2. PMID: 29642940; PMCID: PMC5896039.
16. Tjalsma H., Boleij A., Marchesi J.R., & Dutilh B.E. (2012). A bacterial driver–passenger model for colorectal cancer: beyond the usual suspects. *Nature Reviews Microbiology*, 10(8), 575–582.
17. Yachida S., Mizutani S., Shiroma H., Shiba S., Nakajima T., Sakamoto T., Watanabe H., Masuda K., Nishimoto Y., Kubo M., Hosoda F., Rokutan H., Matsumoto M., Takamaru H., Yamada M., Matsuda T., Iwasaki M., Yamaji T., Yachida T., Soga T., Kurokawa K., Toyoda A., Ogura Y., Hayashi T., Hatakeyama M., Nakagama H., Saito Y., Fukuda S., Shibata T., Yamada T. Metagenomic and metabolomic analyses reveal distinct stage-specific phenotypes of the gut microbiota in colorectal cancer. *Nat Med*. 2019 Jun;25(6):968–976. doi: 10.1038/s41591-019-0458-7. Epub 2019 Jun 6. PMID: 31171880.
18. DeDecker L., Coppedge B., Avelar-Barragan J., Karnes W., Whiteson K. Microbiome distinctions between the CRC carcinogenic pathways. *Gut Microbes*. 2021 Jan-Dec;13(1):1854641. doi: 10.1080/19490976.2020.1854641. Epub 2021 Jan 15. PMID: 33446008; PMCID: PMC8288036.
19. Hugerth L.W., Wefer H.A., Lundin S., Jakobsson H.E., Lindberg M., Rodin S., ... & Andersson A.F. (2014). DegePrime, a program for degenerate primer design for broad-taxonomic-range PCR in microbial ecology studies. *Applied and environmental microbiology*, 80(16), 5116–5123.
20. Schellerer V.S., Langheinrich M.C., Zver V., Grützmann R., Stürzl M., Gefeller O., Naschberger E., & Merkel S. (2019). Soluble intercellular adhesion molecule-1 is a prognostic marker in colorectal carcinoma. *International journal of colorectal disease*, 34(2), 309–317. <https://doi.org/10.1007/s00384-018-3198-0>
21. Fadrosch D.W., Ma B., Gajer P., Sengamalay N., Ott S., Brotman R.M. & Ravel J. (2014). An improved dual-indexing approach for multiplexed 16S rRNA gene sequencing on the Illumina MiSeq platform. *Microbiome*, 2, 1–7.
22. Efimova D., Tyakht A., Popenko A., Vasilyev A., Altukhov I., Dovidchenko N., ... & Alexeev D. (2018). Knomics-Biota—a system for exploratory analysis of human gut microbiota data. *BioData mining*, 11, 1–7.
23. Bolyen E., Rideout J.R., Dillon M.R., Bokulich N.A., Abnet C.C., Al-Ghalith G.A., ... & Caporaso J.G. (2019). Reproducible, interactive, scalable, and extensible microbiome data science using QIIME 2. *Nature biotechnology*, 37(8), 852–857.
24. Callahan B.J., Sankaran K., Fukuyama J.A., McMurdie P.J., & Holmes S.P. (2016). Bioconductor workflow for microbiome data analysis: from raw reads to community analyses. *F1000Research*, 5.
25. Bokulich N.A., Maldonado J., Kang D. W., Krajmalnik-Brown, R. & Caporaso J.G. (2019). Rapidly processed stool swabs approximate stool microbiota profiles. *Msphere*, 4(2), 10–1128.
26. Klindworth A., Pruesse E., Schweer T., Peplies J., Quast C., Horn M., & Glöckner F.O. (2013). Evaluation of general 16S ribosomal RNA gene PCR primers for classical and next-generation sequencing-based diversity studies. *Nucleic acids research*, 41(1), e1–e1.
27. Romanov V.A., Karasev I.A., Klimenko N.S., Koshechkin S.I., Tyakht A.V., & Malikhova O.A. (2022). Luminal and tumor-associated gut microbiome features linked to precancerous lesions malignancy risk: a compositional approach. *Cancers*, 14(21), 5207.
28. Douglas G.M., Maffei V.J., Zaneveld J.R., Yurgel S.N., Brown J.R., Taylor C.M., Huttenhower C. & Langille M.G.I. (2020). PICRUSt2 for prediction of metagenome functions. *Nature biotechnology*, 38(6), 685–688. <https://doi.org/10.1038/s41587-020-0548-6>
29. Kanehisa M. & Goto S. (2000). KEGG: kyoto encyclopedia of genes and genomes. *Nucleic acids research*, 28(1), 27–30.
30. Caspi R., Billington R., Fulcher C.A., Keseler I.M., Kothari A., Krummenacker M. ... & Karp P.D. (2018). The MetaCyc database of metabolic pathways and enzymes. *Nucleic acids research*, 46(D1), D633–D639.
31. Efimova D., Tyakht A., Popenko A., Vasilyev A., Altukhov I., Dovidchenko N., Odintsova V., Klimenko N., Loshkarev R., Pashkova M., Elizarova A., Voroshilova V., Slavskii ., Pekov Y., Filipova E., Shashkova T., Levin E., Alexeev D. Knomics-Biota — a system for exploratory analysis of human gut microbiota data. *BioData Min*. 2018 Nov 6; 11:25. doi: 10.1186/s13040-018-0187-3. PMID: 30450127; PMCID: PMC6220475.

© Карасев Иван Александрович (Ronc-karasev@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

СВОЕОБРАЗИЕ МИКРОБИОТЫ ПОЛОСТИ МАТКИ У ЖЕНЩИН С ГИПЕРПЛАСТИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ЭНДОМЕТРИЯ

FEATURES OF THE MICROBIOTA OF THE UTERINE CAVITY IN WOMEN WITH ENDOMETRIAL HYPERPLASTIC PROCESSES

**N. Kotelnikova
R. Balter
L. Tselkovich
T. Ivanova
O. Ilchenko
T. Pugacheva**

Summary. The microbiota of the uterine cavity and its influence on the prognosis of malignization of atypical hyperplasia in women with simple and atypical endometrial hyperplasia are considered. Comparative analysis and histologic verification of the diagnosis in 216 patients were performed. The results were processed in the medical statistics program MedCalc, version 15.2. *Pseudomonas aeruginosa* and *Parabacteroides* bacteria were most frequently detected in patients with hyperplasia without atypia, and *Atopobium*, *Carnocytophaga* and *Staphylococcus epidermidis* bacteria in women with atypical hyperplasia. The frequency of malignization of hyperplasia with atypia was found to correlate with the presence of normal microflora in the uterine cavity in concentrations exceeding normal values.

Keywords: simple endometrial hyperplasia, atypical endometrial hyperplasia, uterine cavity microbiota, endometritis, malignancy.

Котельникова Надежда Александровна

Самарский государственный медицинский университет
setenovana5@mail.ru

Балтер Регина Борисовна

Кандидат медицинских наук, профессор, заведующий
кафедрой, Самарский государственный
медицинский университет
samaraobsgyn2@yandex.ru

Целкович Людмила Савельевна

Доктор медицинских наук, профессор, Самарский
государственный медицинский университет
samaraobsgyn2@yandex.ru

Иванова Татьяна Владимировна

Кандидат медицинских наук, доцент, Самарский
государственный медицинский университет
t.v.ivanova@samsmu.ru

Ильченко Олеся Андреевна

Кандидат медицинских наук, ассистент, Самарский
государственный медицинский университет
olesay.ilchenko@gmail.com

Пугачева Татьяна Александровна

Кандидат медицинских наук, ассистент, Самарский
государственный медицинский университет
samaraobsgyn2@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается микробиота полости матки и ее влияние на прогноз малигнизации атипичной гиперплазии у женщин с простой и атипичной гиперплазией эндометрия. Проведены сравнительный анализ и гистологическая верификация диагноза у 216 пациенток. Результаты обработаны в программе медицинской статистики MedCalc, версия 15.2. Определено, что у пациенток с гиперплазией без атипии наиболее часто определялись бактерии *Pseudomonas aeruginosa* и *Parabacteroides*, а у женщин с атипичной гиперплазией — *Atopobium*, *Carnocytophaga* и *Staphylococcus epidermidis*. Установлено, что частота малигнизации гиперплазии с атипией коррелирует с присутствием в полости матки нормальной микрофлоры в концентрациях, превышающих нормальные значения.

Ключевые слова: простая гиперплазия эндометрия, атипичная гиперплазия эндометрия, микробиота полости матки, эндометрит, малигнизация.

Гиперпластические процессы эндометрия (ГЭ) достаточно широко распространены в репродуктивном возрасте [1]. По данным Reed S.D., Newton K.M. и соавт. (2009) среди молодых женщин в возрасте до 30 лет частота ГЭ составляет 6:100000 женщин-лет [2]. Имеются сведения, что атипичная гиперплазия эндометрия (АГЭ), которая относится к предраковым состояниям эндометрия, развивается именно в детородном возрасте, имеет стертую клиническую картину и 27,5 %-ный риск прогрессирования в течение двадцати лет. По данным Pellerin G.P., Finance M.A. (2005) 20–25 % женщинам диа-

гноз «рака эндометрия ставится до наступления менопаузы [3].

Исследования гистологической характеристики гиперплазированного эндометрия показали возможную связь с воспалением, обусловленным микробиотой репродуктивного тракта [4–7]. Так, в исследованиях Walther-António MRS (2016) было установлено, что при гиперплазии эндометрия в полости матки преобладают бактерии родов *Parabacteroides* и *Carnocytophaga*. Данные бактерии регистрировались в большом количестве

и у пациенток с карциномой эндометрия. Это позволило предположить, что подобный микробный пейзаж присутствует при ранних стадиях канцерогенеза [8].

Отметим, что изменения микробиоты у женщин с онкологической трансформацией эндометрия отмечали значительно раньше. Так, в 1993 году в исследованиях Mikamo H. было установлено, что у пациенток с различными стадиями рака эндометрия преобладают такие микроорганизмы, как *Streptococcus agalactiae*, *Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae*, *Bacteroides distasonis* и *Prevotella bivia*. В то же время у женщин с нормальным эндометрием наиболее часто регистрировались бактерии *Staphylococcus epidermidis*, *Lactobacillus acidophilus* и *Enterococcus faecalis* [9].

Авторами указано, что гистопатологические изменения эндометрия обусловлены канцерогенным действием масляной и валериановой кислот, вырабатываемых бактериями в процессе их жизнедеятельности.

Подтверждение данным исследованиям приведено в работе Исламиди Д.К., Белых Н.С. и соавт. (2023). В ней систематизированы данные научных публикаций, размещенных в базах данных PubMed, Google Scholar, Scopus, e-Library за период 2010–2021 гг., также указано, что изменения микробной флоры влияют на формирование патологии эндометрия, однако сведения о ее составе противоречивы и требуют дальнейшего изучения [10].

Так, по данным Hamani Y., Eldar I. и соавт. (2013) анаэробная флора в полости матки женщин с полипами эндометрия составляет около 30,0 % от всех микроорганизмов, среди которых преобладают грамотрицательные бактерии рода *Bacteroides* spp. Что касается аэробных микроорганизмов, то там более часто регистрируются представители семейства *Enterobacteriaceae*, в частности, кишечная палочка и грамположительные кокки (стафилококки и стрептококки). Авторы указывают, что у женщин с ГЭ имеется сильная положительная связь с кокковой флорой, кишечной палочкой и анаэробными организмами, присутствующими в полости матки [11].

Позже, с появлением новых технологий и развитием науки, Lu W, He F. и соавт. (2021) путем секвенирования участков V3–V4 гена 16S рРНК (платформа Illumina HiSeq) установили, что у женщин с раком эндометрия наиболее распространенным является *Micrococcus* (тип *Actinobacteria*). Авторами указано, что при наличии *Micrococcus* увеличиваются уровни провоспалительных цитокинов: IL-6 (белок и мРНК) и IL-7 (мРНК). Это же исследование подтвердило гипотезу о воспалительном пути патогенеза рака, обусловленном особенностями микробиоты эндометрия [12].

Заслуживают внимания исследования и отечественных ученых. Так, Ворошила Е.С. и соавт. (2020) на при-

мере тридцати пациенток с ГЭ в сравнении с двадцати тремя пациентками, страдающими ХЭ, доказали, что полость матки не является стерильной. При этом имеется общность микробного пейзажа в обеих группах. Было установлено, что наиболее часто в образцах эндометрия обеих групп определяли *Lactobacillus* spp. (86,1 %), *G. vaginalis* (26,8 %), *U. parvum* (12,7 %) и группу *Enterobacteriaceae* spp. / *Enterococcus* spp. (11,3 %). Прочие группы микроорганизмов определяли в единичных пробах. Вместе с тем вопрос о взаимосвязи отдельных групп условно-патогенной микрофлоры с развитием ГЭ, по мнению авторов, требует дальнейшего изучения [13].

Отметим, что данных, свидетельствующих об участии в канцерогенезе того или иного представителя микробиоты или их сочетания до настоящего времени не выявлено, но сочетание ГЭ с хроническим эндометритом, особенно в группе женщин репродуктивного возраста, требует особого внимания и дальнейших исследований [14, 15].

Соответственно, целью исследования стало изучение микробиоты полости матки у женщин с простой и атипической гиперплазией эндометрия, а также влияние микробиоты полости матки на прогноз малигнизации атипической гиперплазии.

Для этого было обследовано 216 женщин репродуктивного возраста (от 18 до 45 лет). У 122 из них гистологически была установлена гиперплазия эндометрия без атипии (ГЭ), они составили первую группу сравнения. У 94 пациенток установлена атипическая гиперплазия эндометрия (АГЭ), и они составили вторую группу сравнения (гистологический код (8380/2), классификация ВОЗ 2014 г.).

До госпитализации все пациентки были обследованы в соответствии с актуальными протоколами и стандартами, необходимыми для проведения внутриматочных вмешательств. От каждой женщины было получено информированное согласие на проведение диагностических манипуляций: гистероскопия, диагностическое выскабливание полости матки. После установления диагноза все женщины получили лечение в соответствии с действующими клиническими протоколами. Наблюдение за результатами проведенного лечения проводилось на протяжении последующих двух лет.

Помимо гистологической верификации диагноза, также был проведен бакпосев содержимого полости матки. Полученные результаты интерпретировались следующим образом: вид микроорганизмов, обнаруженных в биоматериале, количество колониеобразующих единиц микроорганизмов ($\text{КОЕ} \times 10^n$) и их чувствительность или нечувствительность к основным группам антибиотиков / антимикотиков.

Описание количественных данных в каждой группе проводилось с использованием среднего арифметического (M) и стандартного отклонения (m). Для сравнения количественных данных двух основных групп применяли двухвыборочный критерий Стьюдента ($p < 0,05$). Кроме того, был проведен ROC-анализ предсказательной ценности возможной онкологической трансформации АГЭ с видовым содержанием микрофлоры полости матки.

Отметим, что при интерпретации результатов за объективную оценку качества классификатора была принята площадь под ROC-кривой (AUC). Согласно экспертной шкале оценок AUC интервал 0,9–1,0 оценивался, как отличное качество модели, 0,8–0,9 — как очень хорошее качество модели, 0,7–0,8 — как хорошее, 0,6–0,7 — как среднее, а 0,5–0,6 — как неудовлетворительное. Обработка результатов проводилась в программе медицинской статистики MedCalc (версия 15.2), в полученные результаты описаны в соответствии с ГОСТ Р 50779.10–2000 «Статистические методы. Вероятность и основы статистики. Термины и определения».

Рассматривая гистологическую верификацию диагноза, отметим, что у 27 (22,1±3,8 %) пациенток с ГЭ и у 49 (52,1±5,2 %) женщин с АГЭ гиперпластические изменения сочетались с признаками хронического эндометрита ($p < 0,001$). У этих женщин в гистологических препаратах присутствовала лейкоцитарная инфильтрация, имелись участки очагового фиброза стромы и склеротические изменения стенок спиральных артерий эндометрия. Результаты, полученные от бакпосевов, отражены в таблице 1.

Рассматривая результаты проведенного бакпосева, отметим, что практически все выделенные микроорганизмы не относились к инфекциям. В первой группе сравнения присутствие микроорганизмов в количествах, превышающих физиологические нормы, было выявлено у 24 (19,7±3,6 %) пациенток в то время, как во второй группе сравнения женщин с микробным обсеменением полости матки было 38 (40,4±5,1 %), $p < 0,001$.

Состав микробной флоры также имел различия: в группе женщин с ГЭ из представителей условно патогенной микрофлоры наиболее часто фигурировал *Pseudomonas aeruginosa* (13,9±3,1 % случаев), среди нормальной микрофлоры — *Parabacteroides* (15,6±3,3 %).

В группе с АГЭ микробный пейзаж был несколько иным: у 36,2±4,9 % пациенток определялись представители нормальной флоры *Atopobium*, у 24,4±4,5 % — *Carnocytophaga*, у 21,3±4,2 % — представитель сапрофитной микрофлоры (*Staphylococcus epidermidis*).

Сопоставляя полученные результаты с гистологическими заключениями, укажем, что эндометрит, сопровождающий развитие гиперпластического процесса в эн-

Таблица 1.

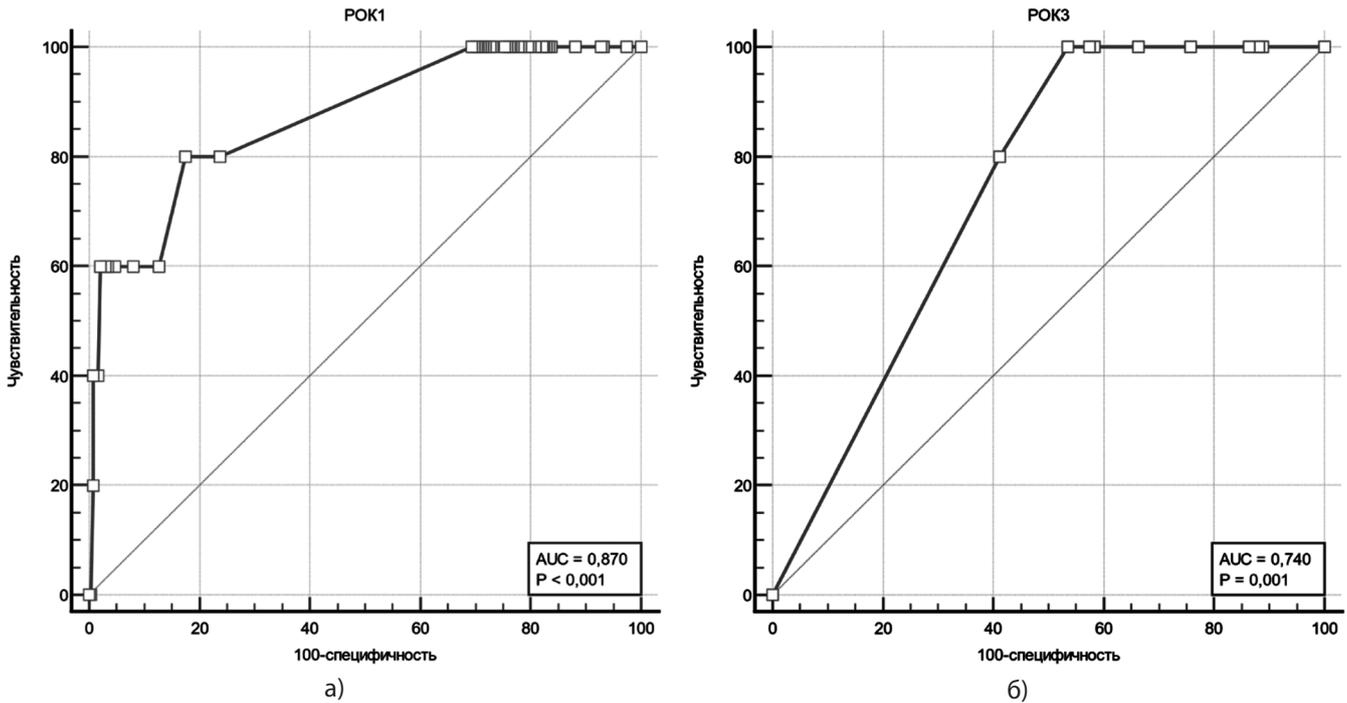
Результаты исследования содержимого полости матки у женщин основных групп (абс — %, при КОЕМ больше нормального показателя для конкретного микроорганизма)

Тип микроорганизма	I группа сравнения (ГЭ)1 n=122	II группа сравнения (АГЭ)2 n=94	p1-2
Условно-патогенная микрофлора			
<i>E. coli</i>	11,4±2,9	7,4±2,7	0,313
<i>Streptococcus agalactiae</i>	14,7±3,2	11,7±3,3	0,514
<i>Staphylococcus aureus</i>	13,1±3,1	9,5±3,1	0,412
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	13,9±3,1	3,2±1,8	0,001
<i>Proteus</i>	7,4±2,3	13,8±3,6	0,135
<i>Citobacter</i>	12,3±2,9	12,8±3,4	0,911
<i>Klebsiella</i>	5,7±2,1	11,7±3,3	0,126
<i>Candida</i>	11,5±2,9	15,9±3,8	0,358
Сапрофитная микрофлора			
<i>Staphylococcus epidermidis</i>	5,7±2,1	21,3±4,2	0,001
<i>Corinebacteriums</i>	9,0±2,6	12,7±3,4	0,408
Нормальная микрофлора			
<i>Carnocytophaga</i>	14,7±3,2	24,4±4,5	0,080
<i>Parabacteroides</i>	15,6±3,3	15,9±3,8	0,952
<i>Lactobacillus</i>	13,1±3,1	21,3±4,2	0,117
<i>Bacteroidetes</i>	9,0±2,6	11,7±3,3	0,539
<i>Atopobium</i>	10,6±2,8	36,2±4,9	<0,001

Примечание. p_{1-2} — степень достоверности статистического различия между показателями групп.

дометрии, был дифференцирован у 53,3 % пациенток с ГЭ и только у 31,9 % женщин с АГЭ, $p < 0,001$. В течение последующих двух лет рецидив в группе с ГЭ регистрировался у 10,7±2,8 % женщин, среди пациенток с АГЭ — в 38,3±5,0 % случаев ($p < 0,001$). Кроме того, у 4,9±1,9 % женщин из группы с ГЭ в течение 2-х лет после окончания лечения была диагностирована АГЭ, а у 5,3±2,03 % женщин из группы с АГЭ была диагностирована карцинома эндометрия

Учитывая имеющиеся публикации, посвященные вопросам влияния микрофлоры на эндометрий, в ходе работы проведен РОК-анализ влияния состава микрофлоры сравниваемых групп на малигнизацию у женщин с АГЭ, результаты отражены в рисунке.



Индекс Юдена J — 0,6255

Связанный критерий — >0,010433494

Чувствительность — 80,00

Специфичность — 82,55

Индекс Юдена J — 0,4638

Связанный критерий — >6,49E11

Чувствительность — 100,00

Специфичность — 46,38

Рис. 1. Прогноз малигнизации АГЭ у женщин сравниваемых групп в зависимости от состояния микробиоты полости матки

Подводя итог, отметим, что полученные результаты свидетельствовали о том, что:

- присутствие условно-патогенной и патогенной флоры влияет на малигнизацию АГЭ (чувствительность прогностической модели составила: 80,00 %, специфичность — 82,55 %, площадь AUC=0,870).
- наиболее значимыми в плане прогноза малигнизации АГЭ являются представители нормальной флоры, такие, как *Carnocytophaga*, *Parabacteroides*, *Lactobacillus*, *Bacteroidetes*, *Atorobium*; их присутствие в полости матки в концентрациях, превышающих нормальные значения, способствует малигнизации АГЭ; чувствительность предсказательной модели составляет 100 % специфичность — 46,38 %, площадь AUC=0,740.

Таким образом, анализ гистологического и клинического диагнозов свидетельствовал о том, что превыше-

ние физиологического количества микробной флоры в полости матки женщины не обязательно сопровождается морфологическими изменениями эндометрия, в том числе, проявлениями эндометрита.

Возможное обсеменение условно-патогенными или нормальными микроорганизмами было результатом попадания микробной флоры из влагалища или цервикального канала в процессе забора материала. При этом у пациенток с гиперпластическими процессами эндометрия имеет значение не только наличие микробной флоры в полости матки, но и ее состав. У женщин с гиперплазией без атипии наиболее часто определялись *Pseudomonas aeruginosa* и *Parabacteroides*, а у женщин с атипичной гиперплазией — *Atorobium*, *Carnocytophaga* и *Staphilococcus epidermidis*. При этом частота малигнизации гиперплазии с атипией коррелирует с присутствием в полости матки нормальной микрофлоры в концентрациях, превышающих нормальные значения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ерофеева Л.Г., Сидоркина А.Г., Новопашина Н.Г., Ерофеев Б.Б. Современное представление о проблеме гиперплазии эндометрия // Научное обозрение. Медицинские науки. — 2022. — Т. 6. С. 82–8. — Режим доступа: <https://science-medicine.ru/ru/article/view?id=1308>
2. Reed S.D., Urban R.R. Classification, and diagnosis of endometrial hyperplasia [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [https://pro.uptodatefree.ir/show/3217#:~:text=INTRODUCTION%20—%20Endometrial%20hyperplasia%20\(EH\),or%20coexist%20with%2C%20endometrial%20carcinoma](https://pro.uptodatefree.ir/show/3217#:~:text=INTRODUCTION%20—%20Endometrial%20hyperplasia%20(EH),or%20coexist%20with%2C%20endometrial%20carcinoma)
3. Pellerin G.P., Finance M.A. Endometrial cancer in women aged 45 years and younger: clinical and pathological analysis // *Obstetrician-gynecologist*. — 2005. V. 193 (5). — P. 1640–4. — Режим доступа: [https://www.ajog.org/article/S0002-9378\(05\)00645-9/fulltext](https://www.ajog.org/article/S0002-9378(05)00645-9/fulltext)
4. Адамян Л.В., Припутневич Т.В., Григорян И.Э., Гаврилова Т.Ю. Современные представления о микробиоте эндометрия // Проблемы репродукции. — 2022. — Т. 28 (6). — С. 159–163. — Режим доступа: <https://www.mediasphera.ru/issues/problemy-reproduksii/2022/6/1102572172022061159>
5. Ванакоева А.И., Долгушина Н.В., Припутневич Т.В. Роль микробиоты полости матки в генезе полипов эндометрия // Акушерство и гинекология. — 2023. — Т. 11. — С. 43–47. — Режим доступа: <https://ru.aig-journal.ru/articles/Rol-mikrobioty-polosti-matki-v-geneze-polipov-endometriya.html>
6. Ильина И.Ю., Доброхотова Ю.Э. Роль окислительного стресса в развитии гинекологических заболеваний // Акушерство и гинекология. — 2021. — Т. 2. С. 150–156. — Режим доступа: <https://ru.aig-journal.ru/articles/Rol-okislitel'nogo-stressa-v-razviti-i-ginekologicheskikh-zabolevanii.html>
7. Казачков Е.Л., Затворницкая А.В., Воропаева Е.Е., Казачкова Э.А., Щеголев А.И. и др. Особенности пролиферативной и антипролиферативной активности клеток эндометрия при его гиперплазии в сочетании с хроническим эндометритом // Акушерство и гинекология. — 2019. Т. 8. — С. 100–106. — Режим доступа: <https://ru.aig-journal.ru/articles/Osobennosti-proliferativnoi-i-antiproliferativnoi-aktivnosti-kletok-endometriya-pri-ego-giperplazii-v-sochetanii-s-hronicheskim-endometritom.html>
8. Walther-António M.R.S., Chen J., Multinu F., Hokenstad A. et al. Potential contribution of the uterine microbiome in the development of endometrial cancer // *Genome Medicine*. — 2016. — V 8 (1). — P. 122. — Режим доступа: <https://genomemedicine.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13073-016-0368-y>
9. Mikamo H. Endometrial bacterial flora detected in patients with uterine endometrial cancer. *Kansenshogaku Zasshi // The Journal of the Japanese Association for Infectious Diseases*. — 1993. — V. 67 (8). P. 712–717. — Режим доступа: https://www.jstage.jst.go.jp/article/kansenshogakuzasshi1970/67/8/67_8_712/_article
10. Исламиди Д.К., Белых Н.С., Ковалев В.В., Миляева Н.М. Вклад микробиоты полости матки в развитие патологических процессов эндометрия // Уральский медицинский журнал. — 2023. Т. 22 (1). — С. 96–103. — Режим доступа: <http://doi.org/10.52420/2071-5943-2023-22-1-96-103>
11. Hamani Y., Eldar I, Sela HY et al. The clinical significance of small endometrial polyps // *Eur J Obstet Gynecol Reprod Biol*. — 2013. — V. 170 (2). P. 497–500. — Режим доступа: [https://www.ejog.org/article/S0301-2115\(13\)00318-7/abstract](https://www.ejog.org/article/S0301-2115(13)00318-7/abstract)
12. Lu W., He F., Lin Z., Liu S. et al. Dysbiosis of the endometrial microbiota and its association with inflammatory cytokines in endometrial cancer // *International Journal of Cancer*. — 2021. — V. 148 (7). — P. 1708–1716. — Режим доступа: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ijc.33428>
13. Ворошилина Е.С., Зорникова Д.О., Копосова А.В. Возможности оценки микробиоты полости матки с использованием ПЦР в реальном времени // Вестник Российского государственного медицинского университета. — 2020. — Т. 1. С. 14–21. DOI: 10.24075/vrgmu.2020.012
14. Chao A., Chao A.S., Sai Lin, Wen H. et al. Analysis of the endometrial lavage microbiota revealed an increased relative content of plastic-decomposing bacteria, *Bacillus pseudofirmus* and *Stenotrophomonas rhizophila* in women with endometrial cancer/ endometrial hyperplasia // *Microbiol affecting the anterior cells*. — 2022. — V. 12:1031967. — Режим доступа: <https://www.frontiersin.org/journals/cellular-and-infection-microbiology/articles/10.3389/fcimb.2022.1031967/full>
15. Кубышкин А.В., Алиев Л.Л., Фомочкина И.И. Воспаление, связанное с гиперплазией эндометрия: его роль в развитии и прогрессировании гиперплазии эндометрия // *Воспаление*. — 2016. — Т. 65 (10). — С. 785–794. — Режим доступа: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00011-016-0960-z>
16. Котельникова Н.А., Ильченко О.А., Балтер Р.Б. Особенности гинекологического и соматического здоровья у женщин с гиперпластическими процессами эндометрия // Интеллектуальный потенциал общества как драйвер инновационного развития науки. — Уфа: АЭТЕРНА. — 2024. С. 111–114. — Режим доступа: <https://aeterna-ufa.ru/events/nk-607>
17. Котельникова Н.А., Целкович Л.С., Иванова Т.В. Влияние микробиоты полости матки у женщин с гиперплазией эндометрия на процесс малигнизации // Интеллектуальный потенциал общества как драйвер инновационного развития науки. — Уфа: АЭТЕРНА. — 2024. — С. 114–118. — Режим доступа: <https://aeterna-ufa.ru/events/nk-607>
18. Котельникова Н.А., Балтер Р.Б., Ларионова С.Н. Изменение гормонального профиля на фоне проводимой терапии у женщин с гиперпластическими процессами эндометрия // Современные задачи и перспективные направления инновационного развития науки. — Уфа: АЭТЕРНА. — 2024. — С. 89–92. — Режим доступа: <https://aeterna-ufa.ru/events/nk-615>
19. Котельникова Н.А., Балтер Р.Б., Иванова Т.В. Состояние рецепторного аппарата эндометрия у женщин репродуктивного возраста, страдающих гиперплазией // Современные задачи и перспективные направления инновационного развития науки. — Уфа: АЭТЕРНА. — 2024. — С. 86–89. — Режим доступа: <https://aeterna-ufa.ru/events/nk-615>
20. Котельникова Н.А., Ильченко О.А., Тюмина О.В. Значение иммуногистохимического исследования (ИГХ) для прогноза малигнизации гиперплазии эндометрия у женщин репродуктивного возраста // Современные задачи и перспективные направления инновационного развития науки. — Уфа: АЭТЕРНА. — 2024. — С. 93–95. — Режим доступа: <https://aeterna-ufa.ru/events/nk-615>

© Котельникова Надежда Александровна (semenovana5@mail.ru); Балтер Регина Борисовна (samaraobsgyn2@yandex.ru); Целкович Людмила Савельевна (samaraobsgyn2@yandex.ru); Иванова Татьяна Владимировна (t.v.ivanova@samsmu.ru); Ильченко Олеся Андреевна (olesay.ilchenko@gmail.com); Пугачева Татьяна Александровна (samaraobsgyn2@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

МИНЕРАЛЬНАЯ ПЛОТНОСТЬ КОСТНОЙ ТКАНИ И ДИФфуЗИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ ЛЕГКИХ У БОЛЬНЫХ ХРОНИЧЕСКОЙ ОБСТРУКТИВНОЙ БОЛЕЗНЬЮ ЛЕГКИХ

BONE MINERAL DENSITY AND LUNG DIFFUSING CAPACITY IN PATIENTS WITH CHRONIC OBSTRUCTIVE PULMONARY DISEASE

E. Kochetova

Summary. The aim of this study was to evaluate bone mineral density (BMD) in patients with chronic obstructive pulmonary disease (COPD) with varying degrees of decreased pulmonary diffusion capacity.

Research methods: A study was conducted on 89 COPD patients, men with a long history of smoking. The average age of the patients was 60.07 ± 5.4 years. According to the severity of bronchial obstruction, 39.33 % of patients corresponded to GOLD 2, 38.2 % of patients to GOLD 3, 22.47 % of patients to GOLD 4. The FVD study was performed on the MasterLab/Jaeger device. The diffusing capacity of the lungs (DLCO), the ratio of the diffusing capacity of the lungs to the alveolar volume (DLCO/Va), body plethysmography, exercise tolerance (6MWD, m), and the severity of dyspnea (according to the mMRC scale) were studied. The bone mineral density (BMD) of the lumbar spine in the direct projection and the proximal femur (neck, Ward's area, greater trochanter) was assessed on a Lunar DPX-NT densitometer. Results. Patients with COPD were divided into 3 groups: group 1 with DLCO < 40 %, group 2 with DLCO 40–60 %, group 3 with DLCO > 60 %. The lumbar spine BMD indices were the lowest in the group with severe DLCO reduction in the lungs. BMD of the Ward's area, greater trochanter, femoral neck, and proximal femur in patients with DLCO < 40 % significantly differed from similar indices in the group of patients with mild diffusion capacity reduction ($p < 0.05$).

Conclusions. COPD patients with DLCO < 40 % were characterized by decreased BMD indices compared to BMD indices in COPD patients with DLCO > 60 % ($p < 0.05$). Reliable correlations of BMD with the diffusion capacity of the lungs were established (a direct relationship of medium strength for BMD of the spine, a direct relationship of medium strength for BMD of the femoral neck). Reliable correlations of BMD with TLC and RLC (inverse relationship of medium strength) were established. During the study, reliable correlations of the diffusion capacity of the lungs with RLC and RLC/TLC (inverse relationship of medium strength for RLC, inverse relationship of medium strength for RLC/TLC) were established.

Keywords: chronic obstructive pulmonary disease; bone mineral density, osteoporosis, diffusion capacity of the lungs, pulmonary hyperinflation.

Кочетова Екатерина Викторовна

кандидат медицинских наук, доцент,
Петрозаводский государственный университет
67011@mail.ru

Аннотация. Целью настоящего исследования было оценить минеральную плотность костной ткани (МПКТ) у больных хронической обструктивной болезнью легких (ХОБЛ) с различной степенью снижения диффузионной способности легких.

Методы исследования: Выполнено исследование 89 больных ХОБЛ, мужчин, имеющих длительный стаж курения. Средний возраст пациентов был $60,07 \pm 5,4$ лет. По степени тяжести нарушений бронхиальной проходимости 39,33 % больных соответствовали GOLD 2, 38,2 % больных GOLD 3, 22,47 % больных GOLD 4. Исследование ФВД проводили на установке «MasterLab/Jaeger». Исследовались диффузионная способность легких (DLCO), отношение диффузионной способности легких к альвеолярному объему (DLCO/Va), плетизмография тела, толерантность к нагрузке (6MWD, м), выраженность одышки (по шкале mMRC). Оценку минеральной плотности костной ткани (МПКТ) поясничного отдела позвоночника в прямой проекции и проксимального отдела бедренной кости (шейка, область Варда, большой вертел) проводили на денситометре Lunar DPX-NT.

Результаты. Больные с ХОБЛ были разделены на 3 группы: 1-я группа с DLCO < 40 %, 2-я группа с DLCO 40–60 %, 3-я группа с DLCO > 60 %. Показатели МПКТ поясничного отдела позвоночника были наименьшими в группе с тяжелой степенью снижения DLCO легких. МПКТ области Варда, большого вертела, шейки бедренной кости, проксимального отдела бедренной кости в целом у пациентов с DLCO < 40 % достоверно отличалась от аналогичных показателей в группе больных с легким снижением диффузионной способности ($p < 0,05$).

Выводы. Больные ХОБЛ с DLCO < 40 % характеризовались снижением показателей МПКТ по сравнению с показателями МПКТ больных ХОБЛ с DLCO > 60 % ($p < 0,05$). Установлены достоверные корреляции МПКТ с диффузионной способностью легких (прямая связь средней силы для МПКТ позвоночника, прямая связь средней силы для МПКТ шейки бедренной кости). Установлены достоверные корреляции МПКТ с ОЕЛ и ООЛ (обратная связь средней силы). В ходе исследования были установлены достоверные корреляции диффузионной способности легких с ООЛ и ООЛ/ОЕЛ (обратная связь средней силы для ООЛ, обратная связь средней силы для ООЛ/ОЕЛ).

Ключевые слова: хроническая обструктивная болезнь легких, минеральная плотность костной ткани, остеопороз, диффузионная способность легких, гиперинфляция легких.

Хроническая обструктивная болезнь легких (ХОБЛ) как болезнь с неоднородным коморбидным фоном характеризуется сочетанием респираторной симптоматики и внелегочных эффектов, главными из которых являются сердечные проявления, кахексия, нарушения работы мышц, остеопороз, депрессия [1]. Остеопороз у пациентов с ХОБЛ часто связан с эмфиземой легких (ЭЛ), плохим состоянием здоровья и плохим прогнозом [2]. ЭЛ, входящая в структуру ХОБЛ, характеризуется прогрессирующим, патологическим разрастанием воздушных пространств и разрушением альвеолярной стенки, что приводит к неэффективному газообмену [3,4]. Функциональный вклад ЭЛ в развитие ХОБЛ оценивают путем измерения диффузионной способности легких (DLCO) [3,5]. В настоящее время обсуждается необходимость функционального фенотипирования на основе данных ОФВ1 и диффузии легких, поскольку это может улучшить прогноз и лечение ХОБЛ [3,5]. Неоднородность клинического профиля больных ХОБЛ связана с доминирующим фенотипом — эмфизематозным или бронхитическим [1,6]. Для больных ХОБЛ с доминантным эмфизематозным типом характерно наличие выраженной гиперинфляции легких (ГИЛ), что в совокупности с «воздушной ловушкой» способствует формированию особой клинической картины. Проверить наличие «воздушной ловушки» и ГИЛ можно путем измерения объемов легких (ОЛ) методом плетизмографии тела. ЭЛ характеризуется снижением DLCO ниже 80 % с сопутствующим уменьшением ОФВ1 ниже 80 % и/или увеличением остаточного объема легких (ООЛ) более 120 % и увеличением соотношения ООЛ/ОЕЛ [6,7,8]. Индекс ООЛ/ОЕЛ чрезвычайно важен для пациентов с ХОБЛ [9]. Учитывая взаимосвязь эмфизематозного фенотипа ХОБЛ и остеопороза, изучение вторичного остеопороза у больных ХОБЛ, патофизиологических факторов, связанных с хроническим воспалением системы, в настоящее время приобретает все большую актуальность [10,11]. Представляет интерес изучить плотность костной ткани у больных ХОБЛ с разной степенью снижения диффузионной способности легких, а также изучить корреляцию показателей МПКТ с DLCO, ООЛ, ОЕЛ.

Цель: оценить минеральную плотность костной ткани у больных ХОБЛ с разным уровнем DLCO, изучить связь между DLCO и МПК, корреляцию DLCO и ООЛ, ОЕЛ.

Методы исследования: исследование проведено на 89 пациентах с ХОБЛ, мужчин с длительным стажем курения. При диагностике ХОБЛ руководствовались классификацией глобальной стратегии диагностики, лечения и профилактики ХОБЛ (Глобальная инициатива по хроническим заболеваниям легких — GOLD).

Критерии включения в исследование: больные с достоверным диагнозом ХОБЛ. Из исследования исключены лица, получавшие глюкокортикостероиды (ГКС)

и имевшие сопутствующие заболевания, которые могли влиять на метаболизм костной ткани.

Средний возраст пациентов был $60,07 \pm 5,4$ лет. По степени тяжести нарушений бронхиальной проходимости 39,33 % больных соответствовали GOLD 2, 38,2 % больных GOLD 3, 22,47 % больных GOLD 4.

Оценку ФВД проводили на многомодульной установке «MasterLab/Jaeger», оценку газообмена комплексом EasyBlood (Gas/Medica) и пульсоксиметрами. Изучалась альвеолокапиллярная диффузия (DLCO), альвеолярный объем, DLCO/Va. Проводилось исследование плетизмографии тела с определением внутригрудного объема газа (ВГОГ), общей емкости легких (ОЕЛ), остаточного объема легких (ООЛ), отношения остаточного объема легких к общей емкости легких (ООЛ/ОЕЛ), резервного объема выдоха (РО выд). Также исследовались газообмен (PaO_2 , $PaCO_2$, SaO_2), толерантность к нагрузке (6MWD, м). Выраженность одышки измеряли по шкале mMRC.

Денситометр Lunar DPX-NT был использован для изучения МПК позвоночника и бедренной кости.

Статистическая обработка результатов была выполнена на IBM-совместимом компьютере с использованием программы Статистика 6.0.

Результаты

Все пациенты имели длительный стаж курения, показатель пачек/лет был 40, одышка по шкале mMRC составляла $2,44 \pm 0,51$, $2,67 \pm 0,5$, $3,0 \pm 0,48$ баллов, 6MWD — $383,38 \pm 102,46$ м, $355,63 \pm 113,38$ м, $224,28 \pm 123,4$ м в зависимости от степени бронхиальной обструкции (таблица 1).

Таблица 1.

Характеристика больных ХОБЛ

Показатели	Больные ХОБЛ GOLD 2 N=35	Больные ХОБЛ GOLD 3 N=34	Больные ХОБЛ GOLD 4 N=20
Средний возраст, годы	$58,58 \pm 5,87$	$61,24 \pm 5,24$	$60,40 \pm 5,10$
ИМТ кг/м ²	$25,94 \pm 5,19$	$24,07 \pm 5,75$	$21,81 \pm 5,8$
Стаж курения, пачек/лет	40 (30–47)	40 (37–44)	40,5 (33–45)
mMRC, баллы	$2,44 \pm 0,51$	$2,67 \pm 0,5$	$3,0 \pm 0,48$
6MWD, м	$383,38 \pm 102,46$	$355,63 \pm 113,38$	$224,28 \pm 123,4$

При оценке показателей плетизмографии тела были получены следующие результаты (таблица 2). Внутригрудной объем газа (ВГОГ) нарастал при усугублении степени бронхиальной обструкции и был $209,32 \pm 59,11$ % у больных ХОБЛ GOLD 4. Остаточный объем легких

(ООЛ) также был наиболее выраженным у больных ХОБЛ GOLD 4 и составил 266,06±107,72 % от должных величин (таблица 2). Показатель ООЛ/ОЕЛ у больных ХОБЛ GOLD 2 был 137,54±29,07 % от должных величин, у больных ХОБЛ с тяжелой и крайне тяжелой степени обструкции 167,83±17,49 % и 191,6±33,56 % соответственно (таблица 2). Установлены достоверные корреляции DLCO легких с ООЛ и ООЛ/ОЕЛ (обратная связь средней силы $r = -0,35$, $p < 0,05$ для ООЛ, обратная связь средней силы $r = -0,39$, $p < 0,05$ для ООЛ/ОЕЛ).

Таблица 2.

Показатели бодиплетизмографии у больных ХОБЛ

Показатели	МПКТ г/см ²		
	Больные ХОБЛ 2 GOLD N=35	Больные ХОБЛ 3 GOLD N=34	Больные ХОБЛ 4 GOLD N=10
Внутригрудной объем газа (ВГОГ) % от должных величин	149,48±26,89	180,75±28,49	209,32±59,11*
Общая емкость легких (ОЕЛ) % от должных величин	114,76±23,62	124,39±27,68	128,87±37,59
Остаточный объем легких (ООЛ) % от должных величин	174,54±62,66	228,15±52,29	266,06±107,72*
ООЛ/ОЕЛ % от должных величин	137,54±29,07	167,83±17,49	191,6±33,56*
Резервный объем выдоха (РО выд) % от должных величин	98,18±55,81	64,26±35,4	50,7±20,92*

Примечание. * — $p < 0,05$

В зависимости от степени снижения диффузионной способности легких (DLCO), больные были разделены на 3 группы: 1-я группа с тяжелой степенью снижения диффузионной способности легких DLCO < 40 %, 2-я группа со средней степенью снижения DLCO 40–60 %, 3-я группа с легким снижением DLCO > 60 % (таблица 3, таблица 4).

Таблица 3.

Показатели одышки и 6MWD у больных ХОБЛ

Показатели	МПКТ г/см ²		
	Больные ХОБЛ DLCO < 40 % N=25	Больные ХОБЛ DLCO 40–60 % N=31	Больные ХОБЛ DLCO > 60 % N=33
mMRC, баллы	3,09±0,56	2,8±0,54	2,47±0,52*
6MWD, м	268,25±133,8	306,33±131,35	400,32±77,36*

Примечание. * — $p < 0,05$

В группе больных с DLCO < 40 % 6MWD был минимальным 268,25±133,8 м, у пациентов DLCO 40–60 % 6MWD был 306,33±131,35 м, при легком снижении DLCO 6MWD 400,32±77,36 м. Одышка по шкале mMRC была наиболее

выраженной (3,09±0,56 баллов) в группе больных DLCO < 40 %.

Результаты МПК поясничного отдела позвоночника были наименьшими у больных ХОБЛ с DLCO < 40 % (таблица 4). Показатели МПКТ бедренной кости, у пациентов с DLCO < 40 % достоверно отличалась от аналогичных результатов в группе больных с DLCO > 60 % ($p < 0,05$). (Таблица 4).

Таблица 4.

Минеральная плотность костной ткани у больных ХОБЛ

Отдел костной системы	МПКТ г/см ²		
	Больные ХОБЛ DLCO < 40 % N=25	Больные ХОБЛ DLCO 40–60 % N=31	Больные ХОБЛ DLCO > 60 % N=33
Поясничный отдел позвоночника L1	0,88±0,13	1,02±0,14	1,04±0,2*
Поясничный отдел позвоночника L2	0,96±0,15	1,10±0,16	1,15±0,23*
Область Варда	0,6±0,12	0,73±0,17	0,77±0,16*
Большой вертел	0,79±0,11	0,88±0,12	0,96±0,14*
Шейка бедренной кости	0,77±0,15	0,92±0,16	0,98±0,13*
Проксимальный отдел бедренной кости в целом	0,88±0,13	1,01±0,16	1,06±0,14*

Примечание. * — $p < 0,05$

При исследовании связи между МПКТ и показателями диффузионной способности легких выявлены достоверные корреляции МПКТ с DLCO: прямая связь средней силы ($r = 0,43$; $p < 0,01$) для МПКТ позвоночника, прямая связь средней силы ($r = 0,57$; $p < 0,01$) для МПКТ шейки бедренной кости.

Также выявлены достоверные корреляции МПКТ с ОЕЛ и ООЛ (обратная связь средней силы ($r = -0,36$; $p < 0,05$) для ОЕЛ и обратная связь средней силы ($r = -0,38$; $p < 0,05$) для ООЛ).

Выводы

1. Больные ХОБЛ с DLCO < 40 % характеризовались снижением показателей МПКТ по сравнению с показателями МПКТ больных ХОБЛ с DLCO > 60 % ($p < 0,05$).
2. Установлены достоверные корреляции МПКТ с диффузионной способностью легких (прямая связь средней силы для МПКТ позвоночника, пря-

мая связь средней силы для МПКТ шейки бедренной кости).

3. Установлены достоверные корреляции МПКТ с ОЕЛ и ООЛ (обратная связь средней силы).

4. Установлены достоверные корреляции диффузионной способности легких с ООЛ и ООЛ/ОЕЛ (обратная связь средней силы для ООЛ, обратная связь средней силы для ООЛ/ОЕЛ).

ЛИТЕРАТУРА

1. Хроническая обструктивная болезнь легких. Клинические рекомендации, 2023 год.
2. Global Initiative for chronic obstructive lung disease, 2024 report.
3. Кытикова О.Ю., Антонык М.В., Гвозденко Т.А., Новгородцева Т.П. Диффузионная способность легких при хронической обструктивной болезни легких: гендерные, возрастные и расовые аспекты // Бюллетень физиологии и патологии дыхания. 2022. Вып.85. С.116–130. DOI: 10.36604/1998-5029-2022-85-116-130.
4. Xu X., Huang K., Dong F., Qumu S., Zhao Q., Niu H., Ren X., Gu X., Yu T., Pan L., Yang T., Wang C. The Heterogeneity of Inflammatory Response and Emphysema in Chronic Obstructive Pulmonary Disease // Front. Physiol. 2021. Vol.12. Article number: 783396. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.783396>.
5. Balasubramanian A., MacIntyre N.R., Henderson R.J., Jensen R.L., Kinney G., Stringer W.W., Hersh C.P., Bowler R.P., Casaburi R., Han M.K., Porszasz J., Barr R.G., Make B.J., Wise R.A., McCormack M.C. Diffusing capacity of carbon monoxide in assessment of COPD // Chest. 2019. Vol.156, Iss.6. P.1111–1119. <https://doi.org/10.1016/j.chest.2019.06.035>
6. Эмфизема легких. Клинические рекомендации 2021 год.
7. Sanders C., Nath P.H., Bailey W. Detection of emphysema with computed tomography: correlation with pulmonary function tests and chest radiography // Invest. Radiol. 1988 V. 23 P. 262–266.
8. Функциональная диагностика в пульмонологии: Практическое руководство / Под ред. Чучалина А.Г. — М.: Издательский холдинг «Атмосфера», 2009. — 192 с.
9. Tae Rim Shin, Yeon-Mok Oh, Joo Hun Park, Keu Sung Lee, Sunghye Oh, Dae Ryoung Kang. The Prognostic Value of Residual Volume/Total Lung Capacity in Patients with Chronic Obstructive Pulmonary Disease // J. Korean Med Sci. 2015 Oct;30(10):1459–1465. 2015. <https://doi.org/10.3346/jkms.2015.30.10.1459>
10. Никитин А.В., Васильева Л.В., Евстратова Е.Ф., Никитин В.А. Прогностическое значение показателей плотности костной ткани у больных хронической обструктивной болезнью лёгких. Клини. Мед. 2017; 95 (12): 1094–1097 DOI <http://dx.doi.org/10.18821/0023-2149-2017-95-12-1094-1097>.
11. Остеопороз. Клинические рекомендации, 2021 год.

© Кочетова Екатерина Викторовна (67011@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

АССОЦИАЦИЯ ГЕНОВ ДЕТОКСИКАЦИИ КСЕНОБИОТИКОВ GSTT1 И GSTM1 С НЕВЫНАШИВАНИЕМ БЕРЕМЕННОСТИ У ЖЕНЩИН ШОРСКОЙ НАЦИОНАЛЬНОСТИ КЕМЕРОВСКОЙ ОБЛАСТИ — КУЗБАСС

ASSOCIATION OF GENES FOR DETOXIFICATION OF XENOBIOTICS GSTT1 AND GSTM1 WITH MISCARRIAGE IN WOMEN OF SHOR NATIONALITY OF THE KEMEROVO REGION — KUZBASS

F. Luzina
A. Doroshilova
S. Palevskaya
A. Zhukova
O. Gulyaeva
A. Kazitskaya
T. Yadykina
T. Ivanova
O. Ilchenko

Summary. The associations of polymorphic variants of GSTM1 and GSTT1 genes and their combinations with miscarriage of pregnancy in women of the Shor nationality of the Kemerovo region were studied, and the possible genetic risk was calculated. In expedition conditions 151 women were examined, 64 of them with miscarriage of pregnancy. The polymorphisms of GSTM1 and GSTT1 genes were typed by Real Time PCR method. A positive association between the GSTM1 gene and the risk of pregnancy failure was revealed. It was found that the protective effect is associated with the combination of «functionally active» genotypes GSTM1 + / GSTT1 +.

Keywords: shors, xenobiotic biotransformation genes GSTM1 and GSTT1, miscarriage.

Лузина Фаина Анисимовна

Кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Научно-исследовательский институт комплексных проблем гигиены и профессиональных заболеваний, г. Новокузнецк
luzina45@mail.ru

Дорошилова Анастасия Викторовна

Научно-исследовательский институт комплексных проблем гигиены и профессиональных заболеваний, г. Новокузнецк
doroshilova_av@mail.ru

Палевская Светлана Александровна

Доктор медицинских наук, проректор, директор, Самарский государственный медицинский университет
s.a.palevskaya@samsmu.ru

Жукова Анна Геннадьевна

Доктор биологических наук, доцент, Заведующий лабораторией, Научно-исследовательский институт комплексных проблем гигиены и профессиональных заболеваний, г. Новокузнецк
nyura_g@mail.ru

Гуляева Ольга Николаевна

Старший научный сотрудник, Научно-исследовательский институт комплексных проблем гигиены и профессиональных заболеваний, г. Новокузнецк
gulyaich1973@mail.ru

Казичка Анастасия Сергеевна

Кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Научно-исследовательский институт комплексных проблем гигиены и профессиональных заболеваний, г. Новокузнецк
anastasiya_kazitskaya@mail.ru

Ядыкина Татьяна Константиновна

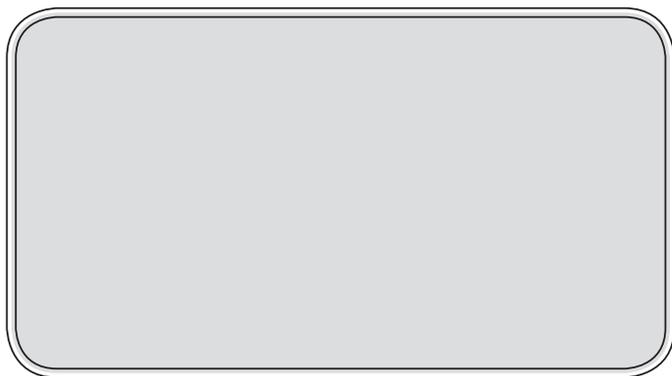
Кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Научно-исследовательский институт комплексных проблем гигиены и профессиональных заболеваний, г. Новокузнецк
yadykina.tanya@yandex.ru

Иванова Татьяна Владимировна

Кандидат медицинских наук, доцент, Самарский государственный медицинский университет
t.v.ivanova@samsmu.ru

Ильченко Олеся Андреевна

Кандидат медицинских наук, ассистент, Самарский государственный медицинский университет
olesay.ilchenko@gmail.com



Невынашивание беременности (НБ) является одним из основных факторов нарушения репродуктивного здоровья женщин — качественной характеристики воспроизводства населения [1].

Несмотря на достижения современной медицины, проблема НБ по-прежнему остается актуальной, так как «влечет за собой не только демографические потери», но и нарушает репродуктивное и социально-психологическое здоровье женщины [2].

Основной вклад в НБ вносят спонтанные аборты, частота которых составляет 15–20 % от всех диагностированных беременностей и на сегодняшний день не имеет тенденции к снижению [3].

Проблема потери беременности особенно значима для коренного малочисленного народа Кемеровской области — шорцев, численность которых систематически сокращается (1989 г. — 12585 человек, 2010 г. — 10672 человек, 2020 г. — 8324 человек) [4]. Для шорцев характерен суженный режим воспроизводства населения, не обеспечивающий простого замещения поколений [5].

Одним из путей решения этой проблемы является поиск возможных причин и диагностических генетических маркеров нарушения репродукции. При этом особое место отводится генам, ответственным за синтез ферментов биотрансформации ксенобиотиков, повреждающее действие которых может происходить на всех этапах беременности [6].

Процесс детоксикации ксенобиотиков — сложная система взаимодействия различных ферментов с экзо- и эндогенными веществами. Ферменты I фазы связывают ксенобиотики и эндобиотики с образованием промежуточных и часто токсичных электрофильных метаболитов, которые под воздействием ферментов II фазы превращаются в водорастворимые нетоксичные соединения и выводятся из организма (III фаза) [2].

Одной из наиболее важных частей ферментов второй фазы системы биотрансформации ксенобиотиков являются глутатион-S-трансферазы (GST).

Аннотация. Исследованы ассоциации полиморфных вариантов генов GSTM1 и GSTT1 и их сочетания с невынашиванием беременности у женщин шорской национальности Кемеровской области, рассчитан возможный генетический риск. В экспедиционных условиях обследованы 151 женщина, из них с невынашиванием беременности — 64 человека. Методом ПЦР Real Time проведено типирование полиморфизмов генов GSTM1 и GSTT1. Выявлена положительная ассоциативная связь между геном GSTM1 и риском невынашивания беременности. Установлено, что протективный эффект связан с сочетанием «функционально активных» генотипов GSTM1 + / GSTT1 +.

Ключевые слова: шорцы, гены биотрансформации ксенобиотиков GSTM1 и GSTT1, невынашивание беременности.

Ферменты GST присутствуют в различных тканях и начинают экспрессироваться с эмбрионального периода. «Полиморфизм генов, контролирующих их синтез, может приводить к повышению или снижению активности соответствующих ферментов и, таким образом, быть причиной дисбаланса между ферментами I и II фаз» [6]. «Следствием такого дисбаланса может быть накопление в организме матери и плода различных токсинов, приводящих к угрозе прерывания беременности на ранних сроках» [6].

Они участвуют не только в метаболизме и детоксикации активных форм кислорода, канцерогенов и ксенобиотиков, но и повышают устойчивость клеток к перекисному окислению липидов, участвуют во внеклеточном транспорте гормонов, в биосинтезе некоторых биологически активных веществ [2, 7].

Центральное место в семействе глутатион-S-трансфераз занимают гены GSTM1, GSTT1. Их мутантные аллели приводят к отсутствию синтеза соответствующих ферментов. Следствие этого — ассоциации с развитием многих болезней женщины, ограничивающих наступление беременности или нарушающих ее течение: миомой матки [8], раком шейки матки [9], раком молочной железы [10], синдромом поликистозных яичников [11], плацентарной недостаточностью, преэклампсией [12], невынашиванием беременности [2, 6, 7, 11, 13, 14].

Анализ обзора литературы по данной проблеме свидетельствует о вовлеченности «нулевых» вариантов генов GSTM1 и GSTT1 в развитие самых разных заболеваний репродуктивной сферы женщины. В то же время, одна и та же патология, в частности НБ, может быть как ассоциированной с названными генами [7, 13, 15–18], так и не связанной с ними [17].

Известно, что частота делеций генов GSTM1 и GSTT1 существенно различается в зависимости от континентального происхождения популяций и их этнической принадлежности [8, 18–20], что имеет значение для достижения цели персонализированной медицины в клинической практике.

Распределение полиморфизмов генов GSTM1 и GSTT1 наиболее полно представлено в крупнейшем мировом систематическом обзоре Nakanishi et al. [8].

Генотип GSTM1 0/0 достаточно широко распространен в популяциях человека, его частота составляет в среднем 0,5: Восточная и Центральная Азия — 0,53 и 0,52; Ближний Восток — 0,49; Европа — 0,52. Самая высокая частота — у жителей Северной Африки — 0,55 и, напротив, у африканцев к югу от Сахары отмечен мировой минимум — 0,27. Частота генотипа GSTT1 0/0 варьирует в диапазоне 0,2–0,3 и редко превышает рубеж 0,4–0,5 [8].

В России генетическая структура популяций характеризуется большим размахом изменчивости делеционных вариантов генов GSTM1 и GSTT1. Этнические группы с максимальной частотой нулевого генотипа GSTM1 — это башкиры (0,63) [21], буряты западные (0,577) и восточные (0,377) [20]. Сниженные частоты имеют самодийские этносы — нганасаны (0,09), селькупы (0,20) Северной Сибири [19], а также телеуты (0,17) [20] и шорцы (0,17–0,23) Южной Сибири [22]. Частота генотипов GSTM1 0/0 и GSTT1 0/0 у русских в целом сходна с распространенностью делеций у представителей европеоидной расы [2, 19–21].

Согласно данным нашего исследования [22] частоты нулевых генотипов GSTM1 0/0 и GSTT1 0/0 у шорцев оказались статистически значимо ниже, чем у пришлого европеоидного населения: GSTM1 0/0 ($\chi^2=9,42$, $p=0,002$), GSTT1 0/0 ($\chi^2=4,62$, $p=0,032$). «Одновременное сочетание «нулевых» генотипов по двум локусам у шорцев встречается в 3–4 раза реже, чем у населения европейского происхождения» [22].

Каждому человеку присуща уникальная комбинация полиморфных вариантов генов системы метаболизма ксенобиотиков и, в зависимости от индивидуальных наследственных особенностей, «дифференциальная чувствительность разных людей к средовым факторам сводится к адаптивному процессу или, напротив, к дезадаптации», сопровождающейся проявлением различных заболеваний [23].

В работах зарубежных и отечественных авторов имеются многочисленные указания на связь глутатион-S-трансфераз с потерей беременности, однако сведения об этнических особенностях распределения генетических маркеров при данной патологии не многочисленны и нередко противоречивы [7, 13, 15, 16, 18, 24].

Проблема изучения молекулярно-генетических механизмов предрасположенности или устойчивости к различным заболеваниям с учетом этно-популяционной специфики региона является актуальной в со-

временной медицине, популяционной и экологической генетике [25]. В связи с этим изучение роли полиморфизма генов системы детоксикации ксенобиотиков (GSTM1 и GSTT1) с невынашиванием беременности у шорок — представительниц коренного малочисленного народа Кузбасса — представляется актуальным.

Целью данного исследования стало изучение и расчет возможного генетического риска невынашивания беременности у женщин шорской национальности Кемеровской области на основании исследования ассоциации полиморфных вариантов генов GSTM1 и GSTT1.

Материал собран в экспедиционных условиях в 2010–2016 гг., а также в 2018 г. Выборка шорцев представлена из основных ареалов их расселения в Таштагольском, Междуреченском и Мысковском районах Кемеровской области. Забор крови у взрослого коренного населения проводился согласно Национальному стандарту «Процедуры взятия проб венозной и капиллярной крови для лабораторных исследований» с заполнением «Информированного согласия». Исследование проведено в соответствии с Хельсинкской декларацией Всемирной медицинской ассоциации «Этические принципы проведения медицинских исследований с участием человека в качестве субъекта» с поправками 2013 г., одобрено Этическим комитетом НИИ КППЗ.

В группу женщин с невынашиванием беременности включены шорки со спорадическими и привычными выкидышами. Численность выборки женщин с невынашиванием беременности (срок гестации до 22 недель) составила 64 человека, без отягощенного акушерского анамнеза по потере беременности — 87 женщин. Группы «случай–контроль» были сопоставимы по возрасту: $48,5 \pm 1,67$ года и $48,6 \pm 1,39$ года соответственно. Сбор информации проводился путем анкетирования, выкопировки данных из первичных медицинских документов: медицинских карт амбулаторного больного, выписок из истории болезни.

Для выделения образцов ДНК из венозной крови использовался стандартный метод фенол-хлороформной экстракции. Типирование полиморфизмов генов GSTM1 и GSTT1 проведено методом ПЦР Real Time с применением наборов реактивов ООО «СибДНК».

Статистическая обработка полученных данных осуществлена в программе SNPStats. Для оценки связи полиморфизмов генов GSTM1 и GSTT1 и их сочетаний с НБ рассчитаны отношения шансов (ОШ) при 95 % доверительном интервале (ДИ).

Результаты распределения полиморфных вариантов генов второй фазы биотрансформации ксенобиотиков (GSTM1 и GSTT1) у женщин шорской национальности

Таблица 1.

Частотные характеристики генов второй фазы биотрансформации ксенобиотиков GSTM1 и GSTT1 у женщин шорской национальности с невынашиванием беременности и в контрольной группе

Группа обследованных		GSTM1		Сумма	GSTT1		Сумма
		+/+ и +/-	0/0		+/+ и +/-	0/0	
Шорки с невынашиванием беременности	абс.	48	16	64	51	13	64
	%	75,0	25,0	100	79,69	20,31	100
Шорки — контроль	абс.	77	1	87	68	19	87
	%	88,51	11,49	100	78,16	21,84	100
χ^2		3,82			0,001		
p		0,049			0,980		
Отношение шансов (ОШ)		2,57 (1,08–6,12)			0,91 (0,41–2,02)		
p		0,031			0,82		

Таблица 2.

Распределение различных сочетаний генотипов GSTM1 и GSTT1 у женщин с невынашиванием беременности и в контрольной группе

Группа обследованных		GSTM1 +/- GSTT1 +	GSTM1 0/0 / GSTT1 +	GSTM1 +/- GSTT1 0/0	GSTM1 0/0 / GSTT1 0/0	Сумма
Шорки с невынашиванием беременности	абс.	37	14	11	2	64
	%	57,81	21,88	17,19	3,13	100
Шорки — контроль	абс.	59	9	18	1	87
	%	67,82	10,34	20,69	1,15	100

с невынашиванием беременности и в контрольной группе приведены в табл. 1.

По распределению «нулевых» генотипов GSTM1 0/0 и GSTT1 0/0 в основной и контрольной группах получены следующие результаты: доля генотипа GSTM1 0/0 в группе женщин с НБ составила 25,0 %, в контроле — 11,49 %. Различия статистически значимы ($\chi^2=3,82$, $p=0,049$). Частота генотипа GSTT1 0/0 у женщин с нарушением репродукции и в контрольной группе не достигает статистической значимости ($\chi^2=0,001$, $p=0,980$).

Сочетание двойных «функционально ослабленных» генотипов GSTM1 0/0 и GSTT1 0/0 у женщин с НБ встречается в 2,7 раза чаще по сравнению с женщинами без отягощенного акушерского анамнеза по потере беременности (0,031 и 0,012 соответственно). В то же время частота комбинации генотипов GSTM1+/GSTT1+, ответственных за нормальную активность ферментов глутатион-S-трансфераз классов μ -1 и θ -1, у женщин с НБ на 10 % ниже, чем в группе сравнения (табл. 2).

Из двух вариантов сочетаний генотипов — со сниженной функциональной активностью и нормальной (GSTM1 0/0 / GSTT1 + и GSTT1 0/0 / GSTM1 +) — женщины

с нулевым генотипом GSTM1 0/0 и хотя бы одним аллелем GSTT1+ имеют повышенный показатель отношения шансов (ОШ=1,57 (0,99–2,51), но при $p=0,058$ различия (между основной и контрольной группами) статистически незначимы. Поэтому носительство данной комбинации генотипов можно рассматривать лишь как тенденцию НБ.

Таким образом, в ходе проведенного исследования у женщин коренной национальности установлена ассоциация «нулевого» генотипа GSTM1 0/0 с нарушением репродукции (ОШ=2,57; 95 % ДИ=1,08–6,12, $p=0,031$) и отсутствие подобного эффекта по делетированному генотипу GSTT1 0/0 (ОШ=0,91; 95 % ДИ=0,41–2,02, $p=0,82$).

Определено, что спонтанный выкидыш является распространенным осложнением беременности. Он обусловлен многими факторами, в том числе и генетической предрасположенностью.

Исходя из данных исследования, подсчитано, что, по сравнению с контрольной группой ($\chi^2=3,82$, $p=0,049$), гомозиготный по делеции генотип GSTM1 0/0 статистически значимо встречается чаще у шорских женщин с невынашиванием беременности.

Одним из потенциальных факторов риска самопроизвольного прерывания беременности может быть окислительный стресс. При нем образование токсичных активных форм кислорода, азота, перекисей и др. превышает функциональную возможность клетки их удалять, что приводит к нарушению баланса между синтезом активных форм кислорода и активностью антиоксидантных ферментов, то есть взаимодействием ферментов первой и второй фаз биотрансформации ксенобиотиков [24, 26]. Такой дисбаланс приводит к интоксикации организма матери и плода, а также влечет за собой развитие многих патологических состояний, в том числе — прерывание беременности. Кроме того, окислительный стресс клетки влияет на ангиогенез, который задействован в дифференцировке эндометрия и эмбрионального роста [27]. Повреждение эндотелия и нарушение васкуляризации плаценты приводит к функциональным изменениям, связанным с потерей беременности [26].

Установлено, что в защите клеток от окислительного стресса важную роль играют ферменты глутатион-S-трансфераз. Их повышенная или пониженная активность зависит от полиморфизма генов, контролирующих их синтез [28].

Невынашивание беременности имеет многофакторную природу и на генетическую связь между вариантом GST и риском нарушения репродукции существенно влияют условия окружающей среды и этническая принадлежность населения. Генетическая предрасположенность реализуется только во взаимодействии со средовыми факторами, которые чрезвычайно разнообразны [29].

Кемеровская область характеризуется высоким уровнем техногенной и антропогенной нагрузки на окружающую среду и по уровню загрязнения занимает второе место в СФО после Красноярского края [30]. Все это создает угрозу здоровью населения Кузбасса. Кроме того, Кузбасс — это эндемичный по йододефициту регион, что также негативно отражается на репродуктивной функции женщины [34].

Сравнение полученных нами данных с результатами исследований других авторов показало, что генетическому риску потери беременности оказываются подвержены чаще женщины-носительницы генотипа GSTM1 0/0.

Подобное было продемонстрировано в исследовании, проведенном в Японии, где частота лиц с делецией гена GSTM1 была значительно выше в случаях привычного выкидыша по сравнению с данными популяционного контроля (61 против 41 %, $p=0,025$) [16]. Нулевого генотипа GSTM1 оказался ассоциированным с риском потери беременности у итальянских [24] и иранских [18] женщин. В одном из двух исследований индийской популяции также выявлена статистически значимая ассо-

циация GSTM1 0/0 с потерей беременности, обнаружено отсутствие риска при генотипе GSTT1 0/0 [7]. Тогда как в другом исследовании ассоциированным с НБ оказался генотип GSTT1 0/0 [15]. В России подобное отмечено у женщин Башкортостана: в основной группе «выявлено достоверное повышение частоты делеции гена GSTT1 по сравнению с показателями контрольной группы (35,9 и 19,5 % соответственно, $\chi^2 = 9,77$; $p < 0,003$)» [32].

В нашем исследовании различия в частоте генотипа GSTT1 0/0 у женщин с нарушением репродукции и в контрольной группе не достигают статистической значимости. Имеются исследования, в которых ассоциации нулевых генотипов с потерей беременности по генам GSTM1 и GSTT1 не выявлены. Так, в исследовании Л.А. Гордеевой и др. [14] делеционный вариант генов GSTM1 и GSTT1 присутствовал с одинаковой вероятностью у женщин с НБ и в контроле, при этом частоты этих генотипов были сопоставимы с распределением их у женщин европейской части России [2].

Неоднозначные результаты такого многофакторного заболевания, как невынашивание беременности могут быть обусловлены различными причинами, в том числе этническими и популяционными особенностями обследуемого населения. Так, расхождения в результатах исследований в Японии оказались связанными с неоднородностью этнического состава населения.

В исследованиях Sata et al. [13] отмечен повышенный риск потери беременности среди женщин при генотипе GSTM1 0/0, с другой стороны, Nonaka et al. [16] не обнаружили ассоциации этого полиморфизма среди женщин с тремя и более потерями беременности.

Расхождение может быть связано с разной этнической принадлежностью населения: Nonaka et al. [16] изучали население Японии, а Sata et al. [13] — население Саппоро, включающее этнические группы айнов и ямато, которые отличаются от общего японского населения.

Общепризнанно, что эволюционно сложившиеся генотип-средовые взаимодействия специфичны для каждой человеческой популяции, генетическая конституция человека обусловлена не только давлением природной и антропогенной среды, но и его расовой и этнической принадлежностью.

В исследованиях, проведенных ранее, нами было установлено, что делеционные варианты генов GSTM1 и GSTT1 в популяции шорцев встречаются реже, чем у европеоидного населения Кузбасса. Статистика такова: шорцы — GSTM1 0/0–0,232 и GSTT1 0/0–0,257, европеоидное население — GSTM1 0/0–0,446 и GSTT1 0/0–0,411 [22]. Несмотря на это, у женщин коренной национальности выявлена статистически значимая связь «нулевого»

генотипа гена GSTM1 с невынашиванием беременности ($\chi^2=3,82$, $p=0,049$), генотип GSTM1 0/0 можно рассматривать как генетический прогностический маркер потери беременности у женщин шорской национальности.

Следует заметить, что GSTM1 включен в качестве гена-кандидата в «Генетическую карту репродуктивного здоровья», разработанную в Институте акушерства и гинекологии им. Д.О. Отта СЗО РАМН (Санкт-Петербург), которая используется врачами-генетиками и акушерами-гинекологами [2].

Носительство комбинаций генотипов GSTM1 0/0 / GSTT1 0/0 и GSTM1 0/0 / GSTT1 + у женщин Горной Шории увеличивает вероятность нарушения беременности. В исследовании В.С. Баранова и О.Н. Беспаловой [2] при анализе сочетания генотипов GSTM1 и GSTT1 аналогично было показано увеличение риска «возникновения, как первого, так и повторных самопроизвольных выкидышей у женщин — носителей «нулевых» генотипов (ОШ=3,23; 95 % ДИ: 1,24–8,35) и (ОШ=3,32; 95 % ДИ: 1,41–7,83)». В ряде зарубежных работ также установлен более высокий риск спонтанного прерывания беременности при сочетании двойных генотипов GSTM1 0/0 / GSTT1 0/0 [7, 33].

Следует отметить, что при исследовании ассоциаций с невынашиванием беременности важен учёт не только «нулевого» варианта гена GSTM1, но и его взаимодействие с другими генами системы глутатион-S-трансфераз. Например, женщины с «нулевым» вариантом гена GSTM1 могут иметь повышенную и компенсаторную экспрессию гена GSTA1. Генотип GSTM1 0/0 может играть защитную роль у женщин-носителей аллеля GSTA1*-69T [25].

В перспективе, при исследовании ассоциаций полиморфных вариантов генов с НБ, планируется расширить спектр генов детоксикации (фаза II), а также генов, кодирующих ферменты микросомального окисления и реакции конъюгации (фаза I), составляющих генную сеть биотрансформации ксенобиотиков.

Данные настоящего исследования ясно показывают, что у женщин шорской национальности наличие «нулевого» варианта гена GSTM1 представляет собой риск невынашивания беременности (ОШ=2,57; 95 % ДИ=1,08–6,12, $p=0,031$).

Комбинация двойных «функционально ослабленных» генотипов GSTM1 0/0 и GSTT1 0/0 у женщин с НБ встречается чаще по сравнению с контрольной группой (0,031 и 0,012 соответственно). Протективный эффект — снижение вероятности потери беременности — связан в основном с «функционально активными» генотипами GSTM1 + / GSTT1 +.

Таким образом, понимание генетических механизмов, определяющих индивидуальную чувствительность к ксенобиотикам, является важным аспектом охраны репродуктивного здоровья женщин коренной национальности Кемеровской области.

Полученные результаты могут быть использованы для разработки дополнительных критериев диагностики и прогноза НБ у женщин коренной национальности Кузбасса, что позволит определить тактику лечебных и профилактических мероприятий, а также может послужить основой для дальнейших эпидемиологических и фармакогенетических исследований в регионе, использоваться в разработке стратегии регионального здравоохранения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев Ю.А. Современное состояние репродуктивного здоровья населения Сибири как фактор сокращения рождаемости в регионе // Регион: экономика и социология. 2013; 2 (78): 215–236.
2. Генетический паспорт — основа индивидуальной и предиктивной медицины. Баранов В.С., редактор. СПб: Изд-во Н-Л; 2009. 528 с.
3. Клинические рекомендации «Выкидыш (самопроизвольный аборт)» / Министерства здравоохранения Российской Федерации, 2021. Режим доступа: http://disuria.ru/_Id/12/1232_kr21002005MZ.pdf
4. Итоги ВПН-2020. Т. 5. Национальный состав и владение языками. Режим доступа: https://rosstat.gov.ru/vpn/2020/Tom5_Nacionalnyj_sostav_i_vladenie_yazykami (Дата доступа: 01.06.2024)
5. Дорошилова А.В., Лузина Ф.А., Палевская С.А., Смбалян С.М. Динамика параметров репродукции и воспроизводства шорцев — коренного малочисленного народа Кемеровской области // Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины. 2020; 28 (3): 390–395. DOI: 10.32687/0869-866X-2020-28-3-390-395.
6. Беспалова О.Н. Генетика невынашивания беременности // Журнал акушерства и женских болезней. 2007; 56 (1): 81–95.
7. Nair R.R., Khanna A., Singh K. Association of GSTT1 and GSTM1 polymorphisms with early pregnancy loss in an Indian population and a meta-analysis. Reproductive Biomedicine Online 2013; 26 (4): 313–322. DOI: 10.1016/j.rbmo.2012.12.004.
8. Nakanishi G., Pita-Oliveira M., Bertagnolli Laís S., Torres-Loureiro S., Scudeler M.M., Cirino H.S. et al. Worldwide Systematic Review of GSTM1 and GSTT1 Null Genotypes by Continent, Ethnicity and Therapeutic Area // OMICS: A Journal of Integrative Biology. 2022; 26 (10): 528–41. DOI: 10.1089/omi.2022.0090.
9. Исакова Ж.Т., Кипень В.Н., Юсуфова М.А., Айтбаев К.А., Букуев Н.М. Вклад вариантов генов семейства глутатионтрансфераз GSTM1, GSTRP1, GSTT1 в формирование предрасположенности к раку шейки матки у женщин кыргызской национальности // Вопросы онкологии. 2022; 68 (6): 805–813. DOI: 10.37469/0507-3758-2022-68-6-805-813.

10. Miao L-F, Ye X-H, He X-F. Individual and combined effects of GSTM1, GSTT1, and GSTP1 polymorphisms on breast cancer risk: a meta-analysis and re-analysis of systematic meta-analyses // *Plos One* 2020;15 (3): e0216147. DOI: 10.1371/journal.pone.0216147.
11. Melo P, Dhillon-Smith R., Islam M.A., Devall A., Coomarasamy A. Genetic causes of sporadic and recurrent miscarriage // *Fertility and Sterility*. 2023; 120 (5): 940–944. DOI: 10.1016/j.fertnstert.2023.08.952.
12. Ковалев В.В., Кудрявцева Е.В. Молекулярно-генетические девиации и акушерская патология // *Акушерство и гинекология*. 2020; (1): 26–32. DOI: 10.18565/aig.2020.1.26-32.
13. Li Lin, Wang Ao, Ke Yi. GSTM1 and GSTT1 polymorphisms and risk of preeclampsia: a system review and meta-analysis // *The Journal of Maternal-Fetal & Neonatal Medicine*. 2023; 36 (2): 223–762. DOI: 10.1080/14767058.2023.2237623.
14. Sata F, Yamada H., Kondo T., Gong Y., Tozaki S., Kobashi G. et al. Glutathione S-transferase M1 and T1 polymorphisms and the risk of recurrent pregnancy loss // *Mol Hum Reprod*. 2003; 9 (3): 165–169.
15. Гордеева Л.А., Попова О.С., Воронина Е.Н., Шаталина И.В., Оленникова Р.В., Нерсисян С.Л. и др. Ассоциации полиморфизма генов ферментов биотрансформации ксенобиотиков с невынашиванием беременности в ранние сроки // *Молекулярная медицина*. 2017;15 (3): 37–44.
16. Parveen F., Faridi R.M., Das V., Tripathi G., Agrawal S. Genetic association of phase I and phase II detoxification genes with recurrent miscarriages among North Indian women // *Molecular Human Reproduction*. 2010; 16 (3): 207–214. DOI: 10.1093/molehr/gap096.
17. Nonaka T., Takakuwa K., Tanaka K. Analysis of the polymorphisms of genes coding biotransformation enzymes in recurrent miscarriage in the Japanese population // *J. Obstet. Gynaecol. Res*. 2011; (37): 1352–1358. DOI: 10.1111/j.1447-0756.2011.01529. x.
18. Берёза И.А., Шаихова Д.Р., Амромина А.М. Взаимосвязь полиморфизмов генов семейства глутатион-S-трансфераз с различными заболеваниями (обзор зарубежной литературы) // *Токсикологический вестник*. 2023; 31 (2): 83–88. DOI: 10.47470/0869-7922-2023-31-2-83-88.
19. Ahmadi R., Salehi Z., Zahiri Z., Faraji Saravani M. Analysis of GSTM1 Polymorphism and Abortion in Guilan Province // *Journal of Mazandaran University of Medical Sciences*. 2013; 22 (1): 234–241.
20. Корчагина Р.П., Осипова Л.П., Вавилова Н.А., Ермоленко Н.А., Воронина Е.Н., Филипенко М.Л. Полиморфизм генов биотрансформации ксенобиотиков GSTM1, GSTT1, CYP2D6, вероятных маркеров риска онкологических заболеваний, в популяциях коренных этносов и русских Северной Сибири // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2011; 15 (3): 448–461.
21. Табиханова Л.Э., Осипова Л.П., Воронина Е.Н., Филипенко М.Л. Распределение полиморфных вариантов генов биотрансформации ксенобиотиков GSTM1, GSTT1 и GSTP1, в популяциях коренных жителей и русских Восточной Сибири // *Медицинская генетика*. 2019; 18 (2):24–34. DOI: 10.25557/2073–7998.2019.02.24-34.
22. Кочетова О.В., Коротина Г.Ф., Ахмадишина Л.Э., Викторова Т.В., Мустафина О.Е. Анализ полиморфных локусов генов ферментов антиоксидантной защиты в этнических группах республики Башкортостан. Научные результаты биомедицинских исследований. 2019; 5 (2): 22–33. DOI: 10.18413/2658–6533-2019-5-2-0–3.
23. Лузина Ф.А., Дорошилова А.В., Гуляева О.Н., Ядыкина Т.К., Казизья А.С., Панев Н.И. Полиморфизм генов глутатион-S-трансфераз M1 и T1 у коренного и пришлого населения Горной Шории // *Медицина в Кузбассе*. 2020; (1):46–51. DOI: 10.24411/2687–0053-2020-1008.
24. Спицын В.А., Макаров С.В., Пай Г.В., Бычковская Л.С. Полиморфизм в генах человека, ассоциирующихся с биотрансформацией ксенобиотиков // *Вестник ВОГиС*. 2006; 10 (1): 97–106.
25. Polimanti R., Piacentini S., Lazzarin N., Vaquero E., Antonietta M., Manfellotto D. et al. Glutathione S-transferase genes and the risk of recurrent miscarriage in Italian women // *Fertility and Sterility*. 2012; 98 (2):396–400.
26. Степанов В.А. Геномы, популяции, болезни: этническая геномика и персонализированная медицина // *ACTA NATURAE*. 2010; 2 (4): 18–34.
27. Zejnullahu V.A., Zejnullahu V.A., Kosumi E. The role of oxidative stress in patients with recurrent pregnancy loss: a review // *Reprod Health*. 2021; 18 (207). DOI: 10.1186/s12978-021-01257-x.
28. Polimanti R., Piacentini S., Fuciarelli M. Map-based study of human soluble glutathione S-transferase enzymes: the role of natural selection in shaping the single nucleotide polymorphism diversity of xenobiotic-metabolizing genes // *Pharmacogenet Genomics*. 2011; (21): 665–672. DOI: 10.1097/FPC.0b013e328349da4d.
29. Самигуллиева А.Э., Торегельдиева Ч.Б. Репродуктивное здоровье женщин: роль экологического неблагополучия (обзор литературы) // *Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана*. 2019; (3): 151–157.
30. Стратегия социально-экономического развития Кемеровской области — Кузбасса на период до 2035 года. Кемерово, 2020. 114 с. Режим доступа: https://www.economy.gov.ru/material/file/c461e87bcae53d7d6f06e406cf24063/kem_obl.pd. (Дата доступа: 01.06.2024).
31. Хамидьянов У.Р., Викторова Т.В., Исхакова Г.М. Роль генов биотрансформации ксенобиотиков в патогенезе нарушений репродуктивной функции у женщин // *Вопросы гинекологии, акушерства и перинатологии*. 2006; 5 (4): 39–41.
32. Geva E., Jaffe Rb. Role of vascular endothelial growth factor in ovarian physiology and pathology // *Fertility and Sterility*. 2000; 74 (3): 429–438. DOI: 10.1016/S0015-0282(00)00670-1.
33. Квиткова Л.В., Барбараш О.Л., Ушакова Г.А. Здоровье женского населения йододефицитного региона Горная Шория. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева; 2005. 231 с.
34. Mavlyanova N.N., Najmutdinova D.K., Boboev K.T. The Role of Xenobiotic Enzyme Genes of the First and Second Phases in the Pathogenesis of Fetal Growth Restriction Syndrome // *Toshkent Tibbiyot Akademiyasi Axborotnomasi*. 2020; (1): 121–127.
35. Котельникова Н.А., Ильченко О.А., Балтер Р.Б. Особенности гинекологического и соматического здоровья у женщин с гиперпластическими процессами эндометрия // *Интеллектуальный потенциал общества как драйвер инновационного развития науки*. Уфа: АЭТЕРНА. 2024: 111–114. Режим доступа: <https://aeterna-ufa.ru/events/nk-607>

36. Котельникова Н.А., Целкович Л.С., Иванова Т.В. Влияние микробиоты полости матки у женщин с гиперплазией эндометрия на процесс малигнизации // Интеллектуальный потенциал общества как драйвер инновационного развития науки. Уфа: АЭТЕРНА. 2024: 114–118. Режим доступа: <https://aeterna-ufa.ru/events/nk-607>
37. Котельникова Н.А., Балтер Р.Б., Ларионова С.Н. Изменение гормонального профиля на фоне проводимой терапии у женщин с гиперпластическими процессами эндометрия // Современные задачи и перспективные направления инновационного развития науки. Уфа: АЭТЕРНА. 2024: 89–92. Режим доступа: <https://aeterna-ufa.ru/events/nk-615>
38. Котельникова Н.А., Балтер Р.Б., Иванова Т.В. Состояние рецепторного аппарата эндометрия у женщин репродуктивного возраста, страдающих гиперплазией // Современные задачи и перспективные направления инновационного развития науки». Уфа: АЭТЕРНА. 2024: 86–89. Режим доступа: <https://aeterna-ufa.ru/events/nk-615>
39. Котельникова Н.А., Ильченко О.А., Тюмина О.В. Значение иммуногистохимического исследования (ИГХ) для прогноза малигнизации гиперплазии эндометрия у женщин репродуктивного возраста // Современные задачи и перспективные направления инновационного развития науки». Уфа: АЭТЕРНА. 2024: 93–95. Режим доступа: <https://aeterna-ufa.ru/events/nk-615>.

© Лузина Фаина Анисимовна (luzina45@mail.ru); Дорошилова Анастасия Викторовна (doroshilova_av@mail.ru);
Палевская Светлана Александровна (s.a.palevskaya@samsmu.ru); Жукова Анна Геннадьевна (nyura_g@mail.ru);
Гуляева Ольга Николаевна (gulyaich1973@mail.ru); Казицкая Анастасия Сергеевна (anastasiya_kazitskaya@mail.ru);
Ядыкина Татьяна Константиновна (yadykina.tanya@yandex.ru); Иванова Татьяна Владимировна (t.v.ivanova@samsmu.ru);
Ильченко Олеся Андреевна (olesay.ilchenko@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ПРИМЕНЕНИЕ СУБЭПИТЕЛИАЛЬНОГО СОЕДИНИТЕЛЬНОТКАННОГО ТРАНСПЛАНТАТА ДЛЯ ЗАКРЫТИЯ РЕЦЕССИЙ ДЕСНЫ

Максимчук Иван Игоревич

врач-стоматолог-хирург, ООО «Авансд медикал иновейшнс клиник север», г. Санкт-Петербург
maximchuk@miaclinic.ru

Пономарёва Маргарита Игоревна

врач-стоматолог-хирург-ординатор,
ЧОУ «Санкт-Петербургский институт стоматологии
последипломного образования»
margaritaponomarevaa@yandex.ru

THE USE OF A SUBEPITHELIAL CONNECTIVE TISSUE GRAFT TO CLOSE GUM RECESSIONS

**I. Maksimchuk
M. Ponomareva**

Summary. The purpose of this study was to evaluate the effectiveness of using a subepithelial connective tissue graft (SCTG) for the treatment of gum recessions, as well as to achieve functional and aesthetic results. **Materials and methods:** the study was conducted at the MIA Clinic in St. Petersburg from July to September 2023. The study involved 6 adults non-smoking patients who were diagnosed with 13 cases of grade I-III gum recessions according to the Miller classification. The treatment was performed using a combination of modified coronary flap displacement (CAF) and SCTG techniques. A CO₂ laser was used to deepithelize the graft, and donor tissues were taken from the palate and maxillary tubercle. Patients underwent clinical examinations within 28 days after surgery, during which the depth of recession and the degree of root coverage were assessed. **Results.** Successful healing without complications was observed in all patients. 12 months after surgery, the depth of the recession decreased significantly, and full root coverage was observed in 5 out of 13 cases. The average percentage of root coverage was 41 %, with an increase in tissue by 2.9±0.3 mm. **Conclusions.** A subepithelial connective tissue graft in combination with the use of a CO₂ laser has shown high efficacy in the treatment of gum recessions, providing significant improvement in root coverage and tissue regeneration. Nevertheless, there are unresolved issues that require further study to optimize techniques and improve the quality of life of patients.

Keywords: gum recession, connective tissue graft, CO₂ laser, dentistry, periodontics.

Аннотация. Цель данного исследования заключалась в оценке эффективности применения субэпителиального соединительнотканного трансплантата (SCTG) для лечения рецессий десны, а также достижения функциональных и эстетических результатов. **Материалы и методы:** исследование проводилось в клинике MIA Clinic в Санкт-Петербурге с июля по сентябрь 2023 года. В исследовании приняли участие 6 взрослых некурящих пациентов, у которых было диагностировано 13 случаев рецессий десны I–III степени по классификации Миллера. Лечение проводилось с использованием сочетания модифицированных техник коронарного перемещения лоскута (CAF) и SCTG. Для деэпителизации трансплантата использовался CO₂-лазер, а донорские ткани были взяты с нёба и верхнечелюстного бугра. Пациенты проходили клинические осмотры в течение 28 дней после операции, при которых оценивалась глубина рецессии и степень покрытия корней. **Результаты.** У всех пациентов наблюдалось успешное заживление без осложнений. Через 12 месяцев после операции глубина рецессии значительно уменьшилась, а полное покрытие корней наблюдалось в 5 из 13 случаев. Средний процент покрытия корней составил 41 %, с увеличением тканей на 2,9±0,3 мм. **Выводы.** Субэпителиальный соединительнотканый трансплантат в сочетании с использованием CO₂-лазера показал высокую эффективность в лечении рецессий десны, обеспечивая значительное улучшение в покрытии корней и регенерации тканей. Тем не менее, остаются нерешённые вопросы, требующие дальнейшего изучения для оптимизации методик и повышения качества жизни пациентов.

Ключевые слова: рецессия десны, соединительнотканый трансплантат, CO₂-лазер, стоматология, пародонтология.

Введение

Рецессия десны является широко распространённым глобальным патологическим состоянием, давно признанным и изучаемым в стоматологии. Её можно определить как апикальное смещение края десны относительно цементно-эмалевого соединения (СЕ), при этом поверхность зубного корня обнажается и становится подверженной воздействию факторов полости рта [1–3].

Современные методы лечения рецессий десны продолжают развиваться, предлагая новые техники и подходы для достижения наилучших результатов. В стоматологической практике важно не только устранение функциональных проблем, но и достижение эстетического совершенства, что требует учета возможных сложностей и осложнений. Изъятие свободного трансплантата соединительной ткани (СТГ) из различных донорских зон демонстрирует хорошие результаты [12] в терапии рецессий десны вокруг зубов (рис.1).

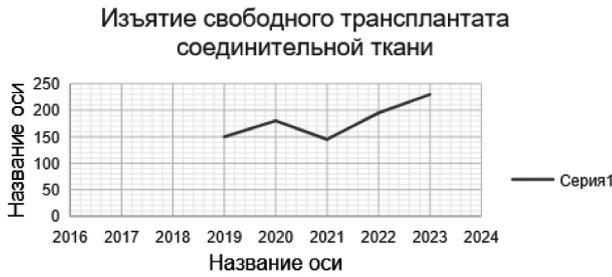


Рис. 1. График, показывающий динамику количества процедур по изъятию свободного трансплантата соединительной ткани в период с 2019 по 2023 годы

Данные на графике демонстрируют изменение числа выполненных операций ежегодно, что позволяет проследить тенденции в использовании данной процедуры в указанный период. Эта тенденция может быть связана с эффективностью методики, которая отличается высоким процентом полного закрытия апикального корня, возможностью лечения рецессий на нескольких зубах одновременно и применимостью даже при недостаточном уровне ороговевшей прикреплённой десны [4].

Тем не менее, аутогенные трансплантаты мягких тканей имеют свои недостатки. Неконтролируемое разрастание слизистой в зоне хирургического вмешательства является одним из них. Это осложнение, хоть и недостаточно изученное, может заметно ухудшить эстетические результаты проведённой операции.

Согласно статистике [12], полученной из различных источников, более 90 % взрослого населения мира сталкивается с этим заболеванием. Одним из характерных осложнений пародонтопатии является рецессия десны. Это осложнение составляет примерно 5–10 % всех случаев пародонтальных заболеваний, которые сопровождаются утратой прикрепления (рис. 2).

Пародонтальные заболевания



Рис. 2. Диаграмма, показывающая распределение пародонтальных заболеваний

Следует отметить, данной проблеме посвящены исследования таких авторов как Григорьянц Л.А., Ашурко И.П., Тарасенко С.В., Есяян А.В., Галяс А.И., Кустова Ю.И., Windisch P., Bertl K и др. Исследователи провели систематические обзоры данной концепции лечения, подчеркивая её преимущества и возможные ограничения (табл. 1).

Таблица 1.

Обзор исследований по протезированию пациентов с полной адентией на основе имплантатов

Автор(ы)	Название исследования	Основные аспекты исследования
Григорьянц Л.А. [1]	Алгоритм лечения пациентов с локальной рецессией десны, осложненной перфорацией корня зуба	Разработка и применение алгоритма лечения пациентов с рецессией десны и перфорацией корня для улучшения клинических результатов.
Ашурко И.П. и др. [2]	Сравнительный гистоморфометрический анализ мягких тканей, сформировавшихся в области дентальных имплантатов после пересадки соединительнотканного трансплантата и коллагенового матрикса. Российская стоматология.	Исследование, сравнивающее микроскопическое строение мягких тканей вокруг имплантатов после применения разных материалов для трансплантации.
Windisch P, Molnár B. [3]	Recession coverage using autogenous grafts	Изучение результатов закрытия рецессии десны с использованием аутогенных трансплантатов для улучшения эстетики и функции тканей.
Azar E. et al. [5]	Концепция комплексного лечения: Систематический обзор	Обзор методик комплексного подхода к лечению стоматологических заболеваний для оптимального управления сложными клиническими случаями.
Tavelli L, Barootchi S, Nguyen TVN, et al. [6]	Histologic and histomorphometric analyses of de-epithelialized free gingival graft in humans.	Гистологический и гистоморфометрический анализ десневых трансплантатов у людей, исследование влияния деэпитализации на заживление и интеграцию.

Как видно по данным исследования, тема актуальна и нуждается в дальнейшем ее изучении для разработки более эффективных методов лечения, улучшения клинических результатов и повышения качества жизни пациентов с заболеваниями пародонта и рецессией десны [7].

Материалы и методы

Данное исследование было проведено в MIA CLINIC г. Санкт-Петербург с июля по сентябрь 2023 г. Всего один пародонтолог занимался лечением 13 случая рецессии десны I, II и III степени по классификации Миллера

у 6 пациентов в частной клинике. Все пациенты были взрослыми, некурящими, с хорошим общим состоянием здоровья, уровнем зубного налёта менее 15 % и частотой кровотечений при зондировании менее 20 %. Перед хирургическим вмешательством каждому пациенту предоставлялись индивидуализированные рекомендации по уходу за полостью рта. От каждого участника было получено информированное согласие на проведение исследования.

После проведения местной анестезии осуществлялось покрытие корней зубов с использованием комбинированного подхода CAF и SCTG. Методика CAF выбиралась из модифицированных техник CAF (без вертикального разреза) и модифицированной туннельной техники, в зависимости от количества затронутых зубов и степени рецессии десны. В каждой из методик использовался лоскут полной или частичной толщины, который перемещался выше слизисто-десневого соединения, чтобы обеспечить его свободное смещение в корональном направлении без натяжения. Перед пересадкой обнажённая корневая поверхность обрабатывалась с помощью кюрет Gracey (производитель Hu-Friedy, Чикаго, Иллинойс, США). Для подготовки аутотрансплантата SCTG свободный десневой трансплантат (FGG) брали с донорских участков и проводили его деэпителизацию вне полости рта. В качестве донорских зон для FGG выбирались слизистая оболочка твёрдого неба и бугор верхней челюсти, исходя из состояния соответствующего участка и требуемых размеров трансплантата.

Деэпителизация FGG вне полости рта проводилась с использованием CO₂-лазера (Opelaser Pro, Yoshida Dental Clinic, Токио, Япония). Система CO₂-лазера с длиной волны 10,6 мкм работала в режиме непрерывного излучения с мощностью 1,0 Вт. После лазерной обработки любые остатки эпителия удалялись с помощью лезвия длиной 15 мм. Затем трансплантаты помещались на подготовленное сосудистое ложе и адаптировались под его контур.

Постоперационный уход включал назначение пациентам антибиотика «Амоксициллин» 875 мг + «Клавулановая кислота» 125 мг / Амоксиклав 625 мг (Россия) в течении 7 дней, 1 таблетка 2 раза в день. В случае возникновения болевых ощущений они также принимали диклофенак в дозировке 25 мг (Япония). Пациентам было предписано воздерживаться от чистки зубов в зонах хирургического лечения до снятия швов через 14 дней. С 14-го по 28-й день рекомендовалось использовать зубные щетки с мягкой щетиной. Пациенты приходили на контрольные осмотры на 1-й, 3-й, 7-й, 14-й и 28-й день после операции, где проводились клинические осмотры и профессиональная гигиена полости рта.

До операции и спустя год осуществлялись измерения ширины кератизированной десны и глубины рецессии.

Эти параметры, наряду с измерениями среднего и полного покрытия корней, оценивались одним и тем же специалистом для обеспечения точности данных.

Результаты

Демографические данные участников исследования на начальном этапе приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Описательный анализ субъектов исследования на исходном уровне

Параметры	Значения
Возраст (годы; среднее значение ± sd)	45.2±12.6
Пол (n)	4 мужчины (66,7 %)
	2 женщины (33,3 %)
Тип зуба (n, %)	4 резца (30,7 %)
	4 клыка (30,7 %)
	2 премоляра (15,5 %)
	3 моляра (23,1 %)
Класс измельчения (n, %)	3 Класс I (58,3 %)
	2 класс (41,7 %)
	16 Класс III (41,7 %)

Всего к терапии CAF+SCTG приступили 6 пациентов (2 женщины и 4 мужчины) со средним возрастом 46,3±12,6 лет. В исследуемой выборке было 4 резца, 4 клыка, 2 премоляра и 3 моляра. Таблица 3 демонстрирует распределение донорских участков и методы покрытия корней.

Таблица 3.

Распределение участков-доноров и методы укрытия корней

Места забора трансплантатов	Нёбо	16 (95.2 %)
	Бугор верхней челюсти	1 (4.8 %)
Методы, используемые для участка реципиента	Модифицированная техника туннелирования	6 (28.6 %)
	Коронарное смещение лоскута	12 (71.4 %)

Более 50 % рецессий соответствовали III классу по классификации Миллера. У всех шестерых участников заживление проходило без осложнений, таких как кровотечение, образование гнойного отделяемого или абсцессов, расхождение краев раны или отторжения трансплантата. Через 12 месяцев глубина рецессии (RD) значительно уменьшилась по сравнению с исходным уровнем. Полное покрытие корней удалось достичь

в 5 из 13 случаев рецессии. На рисунках 3 и 4 представлена детальная информация по одному клиническому случаю.



Рис. 3. Случай пациентки 32 года. (А) Диагноз код по МКБ10: K06.01 Генерализованная рецессия десны в области зубов 3.3–4.3



Рис. 4. (В) Свободный десневой трансплантат взят с дистального участка неба. Получен соединительнотканый трансплантат

Таким образом, в результате лечения среднее покрытие корней (MRC) составило 41,0 % и сопровождалось средним приростом тканей на $2,9 \pm 0,3$ мм ($p < 0,05$).

Обсуждение

На сегодняшний день разработано и используется множество методов забора соединительнотканного транспланта. Популярными способами являются «методика мышеловки» и «метод одного разреза». Длина и толщина извлечённой соединительной ткани в этих методах зависят от анатомических особенностей неба пациента. В ряде клинических случаев бывает невозможно извлечь достаточное количество соединительной ткани, и есть вероятность, что образцы могут содержать жир или железистую ткань, что ухудшает результат манипуляции по полному покрытию поверхности корня. В рандомизированных контролируемых испытаниях 2010 года были проанализированы результаты покрытия [9–12] поверхности корней с применением соединительнотканного транспланта, взятым с помощью метода «мышеловки» и транспланта, полученного методом деэпителизации FGG.

Исследования показали, что между методами забора соединительнотканного транспланта нет значительных различий в эффективности покрытия поверхности корней. Метод деэпителизации позволяет изъять достаточное количество ткани, даже у пациентов с тонкой слизистой, и содержит больше соединительной и меньше жировой/железистой ткани по сравнению с другими методами. Также деэпителизация с помощью лазера Er, Cr:YSGG удобнее, чем с использованием стандартного лезвия.

Недавно в базальной пластинке слизистой оболочки полости рта были выявлены уникальные компоненты кератизированной слизистой [10]. Гистологические исследования показали, что после деэпителизации сохраняются базальная и собственная пластинки. CO₂-лазер воздействует лишь на эпителий, не повреждая другие слои. Для подтверждения результатов метода CODE необходимы дополнительные исследования с контрольными группами, а также эксперименты для выяснения биологического механизма действий. Кроме того, важно изучить биологический механизм, лежащий в основе положительных эффектов лазерного воздействия, что может открыть новые пути для улучшения хирургических техник. В будущем такие исследования могут привести к разработке новых протоколов, которые улучшат как функциональные, так и эстетические результаты операций на слизистой оболочке полости рта.

В заключение можно отметить, что использование субэпителиального соединительнотканного транспланта для лечения рецессий десны показывает перспективные результаты, особенно в условиях сохраняющейся потребности в улучшении эстетики и функциональности в стоматологии. Применение таких техник как метод «мышеловки» и «деэпителизация» CO₂-лазером позволяет эффективно решать проблему рецессий, обеспечивая высокий процент покрытия корней и улучшенную регенерацию тканей. Несмотря на достижения, остаются нерешённые вопросы, связанные с неконтролируемым разрастанием слизистой и другими возможными осложнениями. Таким образом, актуальность и востребованность дальнейших исследований для оптимизации методов и улучшения качества жизни пациентов остаётся высокой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алгоритм лечения пациентов с локальной рецессией десны, осложненной перфорацией корня зуба /Л.А. Григорьянц [и др.] // Клиническая стоматология. — 2002. — №4. — С. 30–32.
2. Ашурко И.П., Тарасенко С.В., Есаян А.В., Галяс А.И., Кустова Ю.И. Сравнительный гистоморфометрический анализ мягких тканей, сформировавшихся в области дентальных имплантатов после пересадки соединительнотканного трансплантата и коллагенового матрикса. Российская стоматология. — 2022. — №15(2). — С. 22–30.
3. Windisch P, Molnár B. Recession coverage using autogenous grafts // *Gingival Recession Management*. — 2018. — pp. 97–119.
4. Bertl K., Pifl M., Hirtler L., et al. Relative composition of fibrous connective and fatty/glandular tissue in connective tissue grafts depends on the harvesting technique but not the donor site of the hard palate // *J Periodontol*. — 2015. — № 86. — pp. 1331–9.
5. Azar E., et al. Histologic and histomorphometric analyses of de-epithelialized free gingival graft in humans // *Int J Periodontics Restorative Dent*. — 2019. — № 39. — pp. 221–6.
6. Tavelli L., Barootchi S., Nguyen T.V.N., et al. Efficacy of tunnel technique in the treatment of localized and multiple gingival recessions: a systematic review and meta-analysis // *J Periodontol*. — 2018. — № 89. — pp. 1075–90.
7. Bertl K., Pifl M., Hirtler L., Rendl B., Nürnberger S., Stavropoulos A., et al. Relative composition of fibrous connective and fatty/glandular tissue in connective tissue grafts depends on the harvesting technique but not the donor site of the hard palate // *J Periodontol*. — 2015. — № 86. — pp. 1331–9.
8. Lin J.C., Nevins M., Kim D.M. Laser de-epithelialization of autogenous gingival graft for root coverage and soft tissue augmentation procedures // *Int J Periodontics Restorative Dent*. — 2018. — № 38. — pp. 405–11. — doi: 10.11607/prd.3587. — PMID: 29641630.
9. Downing B.R., Cornwell K., Toner M., Pins G.D. The influence of microtextured basal lamina analog topography on keratinocyte function and epidermal organization // *J Biomed Mater Res A*. — 2005. — № 72. — pp. 47–56. — doi: 10.1002/jbm.a.30210. — PMID: 15543632.
10. Bush K.A., Downing B.R., Walsh S.E., Pins G.D. Conjugation of extracellular matrix proteins to basal lamina analogs enhances keratinocyte attachment // *J Biomed Mater Res A*. — 2007. — № 80. — pp. 444–52.
11. Komori T., Ono M., Hara E.S., et al. Type IV collagen $\alpha 6$ chain is a regulator of keratin 10 in keratinization of oral mucosal epithelium // *Sci Rep*. — 2018. — № 8. — p. 2612. — PMID: 29422532.
12. Федеральная служба государственной статистики (rosstat.gov.ru)

© Максимчук Иван Игоревич (maximchuk@miaclinic.ru); Пономарёва Маргарита Игоревна (margaritaponomarevaa@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ПОДХОДЫ К КОРРЕКЦИИ ЛИПИДНОГО ОБМЕНА В ПРОФИЛАКТИКЕ И ЛЕЧЕНИИ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ

Муратова Сетора Баходир кизи

Врач кардиолог,
врач функциональной диагностики, АО ГК Медси
ds115151515@gmail.com

APPROACHES TO CORRECTION OF LIPID METABOLISM IN THE PREVENTION AND TREATMENT OF CARDIOVASCULAR DISEASES

S. Muratova

Summary. Dyslipidemia is a recognized risk factor for cardiovascular diseases, which requires its timely and effective correction. The article presents the results of an analytical study of a review of modern approaches to the correction of lipid metabolism, their effectiveness, and limitations. According to the results of the analysis, the current recommendations for the correction of dyslipidemia require additional clinical studies to determine the possibility of using new pharmacological agents, their comparative effectiveness and prescription options. The results of the study indicate the need for a comprehensive, personalized approach to the correction of lipid metabolism in the prevention and treatment of cardiovascular diseases, with an assessment of the possible risks and benefits of therapy.

Keywords: dyslipidemia, correction of lipid metabolism, low-density lipoproteins, cardiovascular diseases, cholesterol, lipid-lowering therapy.

Аннотация. Дислипидемия является признанным фактором риска сердечно-сосудистых заболеваний, что требует ее своевременной и эффективной коррекции. В статье приведены результаты аналитического исследования обзора современных подходов к коррекции липидного обмена, их эффективность и ограничения. Согласно результатам выполненного анализа, действующие в настоящее время рекомендации по коррекции дислипидемии требуют дополнительных клинических исследований по определению возможности применения новых фармакологических средств, их сравнительной эффективности и возможностей назначения. Результаты выполненного исследования свидетельствуют о необходимости комплексного, персонализированного подхода в коррекции липидного обмена при профилактике и лечении сердечно-сосудистых заболеваний, с оценкой возможных рисков и преимуществ терапии.

Ключевые слова: дислипидемии, коррекция липидного обмена, липопротеины низкой плотности, сердечно-сосудистые заболевания, холестерин, гиполипидемическая терапия.

Дислипидемия — состояние, возникающее вследствие ряда генетических и приобретенных нарушений, является распространенной проблемой во многих странах мира и является установленным фактором риска заболеваний сердечно-сосудистой системы [1]. О наличии дислипидемии свидетельствуют изменения следующих показателей: повышение выше нормальных значений уровней общего холестерина, холестерина липопротеинов низкой плотности (ЛПНП) и триглицеридов, а также снижение концентрации липопротеинов высокой плотности (ЛПВП), а величина отклонения этих показателей от нормальных значений характеризует тяжесть течения заболевания, критерий его прогноза и показатель эффективности лечения [2, 3]. Для того, чтобы снизить заболеваемость и смертность от состояний, характеризующихся нарушением липидного обмена, необходимо своевременно диагностировать данное состояние и скорректировать его.

Цель исследования — проанализировать основные подходы к коррекции липидного обмена, существующие в настоящее время, их достоинства и недостатки.

Материалы и методы исследования

Обзорное исследование выполнено путем анализа данных, представленных в публикациях, размещенных в базах данных PubMed, eLibrary, Cyberleninka, Google Scholar. Глубина поиска составила 10 лет. Поиск осуществлялся по следующим ключевым словам: «коррекция липидного обмена», «дислипидемии», «липопротеины низкой плотности», «сердечно-сосудистые заболевания», «холестерин», «гиполипидемическая терапия».

Результаты и обсуждение

Липиды имеют основополагающее значение для жизни живого организма: холестерин и фосфолипиды входят в состав клеточных мембран, холестерин используется при синтезе ряда гормонов (надпочечников, яичников, яичек), триглицериды — являются источником энергии и основным компонентом жировой ткани [4]. В то же время отклонение их уровня от нормы вызывает развитие патологических состояний, ухудшающих самочувствие человека, вызывающих развитие заболеваний, острых и хронических, способствующих инвалидизации

и повышающих смертность населения. Так, повышенный уровень ЛПНП является одним из наиболее распространенных факторов риска развития атеросклероза вследствие повреждения сосудистой стенки и образования пенных клеток и последующего заболевания сердечно-сосудистой системы [2, 5–7]. Снижение уровня холестерина ЛПНП у пациентов с острым коронарным синдромом является основным направлением вторичной профилактики ишемической болезни сердца [8, 9].

Дислипидемии имеют различную природу и могут быть генетически обусловленными (первичная гиперлипидемия), и приобретенными (вторичная гиперлипидемия), что определяет сложности к выбору успешного метода лечения данных патологических состояний.

В настоящее время существуют немедикаментозные и медикаментозные подходы к коррекции липидного обмена. В группу **немедикаментозных подходов** входят коррекция образа жизни пациента, увеличение его ежедневной физической активности и снижение повышенной массы тела, диетотерапия. Согласно клиническим рекомендациям «Нарушения липидного обмена» 2023 г., тактика лечения избирается исходя из исходного уровня сердечно-сосудистого риска у пациента и направлена на снижение уровня холестерина ЛПНП [10].

Немедикаментозная коррекция дислипидемии заключается в соблюдении диеты со снижением калорийности потребляемой пищи, наряду с высоким содержанием овощей и фруктов, клетчатки и цельнозерновых злаков, молочных продуктов, а также продуктов, содержащих омега-3 полиненасыщенные жирные кислоты (ПНЖК) (орехи, рыба, растительные масла), что признается первичным в качестве первичной и вторичной профилактики сердечно-сосудистого риска [10, 11].

Одним из немедикаментозных подходов снижения риска возникновения сердечно-сосудистых заболеваний при лечении гиперхолестеринемии является применение растительных стеролов (фитостеролов/фитостеринов) и станолов (фитостанолов) — жирорастворимых соединений, относящихся к семейству тритерпенов, являющихся естественными компонентами растительных клеток многих растений, применяемых в пищу (зародыши пшеницы, семена кукурузы, бобовые и др.) и конкурирующих с холестерином за всасывание в кишечнике. При попадании в желудочно-кишечный тракт фитостеролы конкурируют с холестерином за включение в смешанные мицеллы и последующее всасывание в энтероцитах; как следствие, при увеличении в потребляемой пище фитостеролов ингибируется всасывание холестерина. Кроме того, фитостеролы снижают количество всасывания холестерина путем прямого связывания с ним в кишечнике и облегчая его выведение из организма. A. Poli et al. (2021) в своем обзорном исследовании оце-

нили возможности использования с целью коррекции липидного обмена фитостеролов и определили эффективность их ежедневного приема [12]. Не оказывая влияние на содержание ЛПВП, фитостеролы способны снижать уровень триглицеридов в плазме, особенно если уровень фитостеролов превышает 150 мг/дл [13, 14].

В публикации В.В. Федотовой (2022) определены различия в выраженности гиполипидемического эффекта фитостеролов у лиц с различными генетическими полиморфизмами холестерина-7-альфа-гидроксилазы и аполипротеина Е, что предлагается исследовать в дальнейших исследованиях [15].

Существует ряд результатов исследований, ограничивающих широкое использование фитостеролов для коррекции липидного обмена. Так, V.Z. Rocha et al. (2016) определили, что, несмотря на гиполипидемическое действие фитостеролов и умеренное противовоспалительное действие, у лиц с ожирением отсутствовали выраженный гиполипидемический и противовоспалительный эффекты [16]. Отмечено также снижение всасывания жирорастворимых витаминов при употреблении фитостеролов, в частности — витаминов D, E в плазме крови; снижение витамина К не выявлено [17]. Присутствует риск поражения печени в случае парентерального введения фитостеролов [13].

Помимо диетотерапии, существует также **медикаментозный подход к коррекции липидов**. Согласно рекомендациям Евразийской ассоциации кардиологов, для лечения дислипидемий применяются статины, фибраты, ингибиторы всасывания холестерина в кишечнике, ингибиторы пропротеиновой конвертазы субтилизин-кексинного типа 9 (PCSK9), а также препараты, содержащие омега-3 ПНЖК [18].

Одними из наиболее изученных классов препаратов по коррекции липидов для снижения риска сердечно-сосудистых заболеваний являются **статины** — препараты, ингибирующие ГМГ-Ко-А-редуктазу, ключевой фермент в синтезе холестерина (розувастатин, аторвастатин, симвастатин, питавастатин). В результате в печени снижается уровень холестерина, наряду с увеличением в гепатоцитах количества рецепторов ЛПНП и участвуя в умеренном снижении уровня триглицеридов. Также статины за счет снижения уровня липидов способствуют регрессии атеросклеротической бляшки [19, 20]. Терапия статинами рассматривается в качестве способа уменьшения абсолютных концентраций в плазме крови всех подклассов ЛПНП, что определяет снижение сердечно-сосудистого риска [21, 22], в том числе у пациентов с высоким сердечно-сосудистым риском [23]. Наряду с диетотерапией, регулярными физическими аэробными упражнениями, здоровым образом жизни терапия статинами рассматривается в качестве эф-

фективного подхода лечения дислипидемии, особенно у пациентов с умеренным и высоким риском атеросклеротического сердечно-сосудистого заболевания [7, 24]. Однако гепатотоксичность статинов, наряду с ростом заболеваний печени, включая неалкогольную жировую болезнь печени и гепатит С, а также побочные эффекты в виде миопатии и миалгии создали новую проблему при определении тактики лечения дислипидемий у пациентов с высоким сердечно-сосудистым риском [18, 25]. Кроме того, учитывая возможность проникновения статинов через плаценту и в грудное молоко, у беременных пациенток и в период лактации прием статинов не рекомендован [26].

Наряду со статинами при коррекции липидного обмена предложено применение **фибратов** (фенофибрат), механизм действия которых заключается в активации альфа-рецепторов, активируемых активатором пероксисом, участвующих в регуляции метаболизма липидов и липопротеидов, эндотелиальной функции, снижении воспалительных реакций. Основные механизмы снижения уровня триглицеридов в сыворотке и умеренного повышения уровня холестерина ЛПВП объясняются индукцией под воздействием фибратов изменений в транскрипции генов, контролирующей стадии липидного метаболизма (активация пролифераторов пероксиса), что вызывает увеличение продукции основных аполипопротеинов ЛПВП и липопротеинлипазы, активацию катаболизма триглицеридов и позволяет снизить сердечно-сосудистый риск при первичной профилактике [10, 27]. Подчеркивается необходимость клинических исследований применения фибратов для вторичной профилактики дислипидемий у пациентов с предшествующими заболеваниями сердечно-сосудистой системы, включая инсульт и ишемическую болезнь сердца [28].

В качестве перспективного препарата по коррекции дислипидемии анализируется препарат эзетимид — селективный **ингибитор абсорбции холестерина** [29]. Так, И.С. Сабиров и соавт. (2020) проанализировали возможность сочетанного применения статинов и эзетимида при лечении дислипидемической гипертензии: согласно полученным результатам, требуется учитывать индивидуальные особенности течения заболевания пациента, включая анамнез его заболевания и историю предыдущего применения фармакотерапевтических средств [30]. Требуется дополнительные клинические исследования в отношении клинической эффективности эзетимида для снижения риска сердечно-сосудистых заболеваний.

К **ингибиторам PCSK9** относятся препараты алирокумаб и эволокумаб. Механизм действия ингибиторов PCSK9 заключается в снижении уровня холестерина ЛПНП в плазме. Белок PCSK9 связывается с ЛПНП в ге-

матоцитах, что вызывает снижение элиминации холестерина ЛПНП из кровеносного русла; следовательно, ингибиторы PCSK9, связываясь с этим белком, способствуют снижению холестерина ЛПНП [7, 10]. Как и статины, ингибиторы PCSK9 способны снижать уровень триглицеридов и вызывать небольшое увеличение уровня холестерина ЛПВП [31]. Эффективность ингибиторов PCSK9 определяется наличием ЛПНП, что определяет отсутствие эффекта от применения ингибиторов PCSK9 пациентами с гомозиготной семейной гиперхолестеринемией с дефицитом рецепторов [32]. В настоящее время ингибиторы PCSK9 исследуются в качестве эффективной альтернативы терапии статинами в случае статинассоциированных мышечных симптомов, включая острое повреждение почек, вызванное рабдомиолизом. Отмечается, что ингибиторы PCSK9, в отличие от статинов, не влияют на риск возникновения сахарного диабета, геморрагического инсульта, катаракты, не имеют когнитивных эффектов и не взаимодействуют с антиретровирусными препаратами. В данном направлении в настоящее время требуются дальнейшие крупные, адекватно спланированные долгосрочные клинические исследования [26].

Препараты, содержащие омега-3 ПНЖК (альфа-линоленовая кислота, эйкозапентаеновая кислота, докозагексаеновая кислота), согласно современным исследованиям, позволяют снизить уровень триглицеридов [10]. Омега-3 ПНЖК ингибируют экспрессию липогенных генов, что позволяет снизить общий холестерин и холестерин ЛПНП, уровень триглицеридов [32, 33]. Отмечается необходимость дополнительных клинических исследований в определении эффективности применения данной группы препаратов [32]. Также требуются сравнительные клинические исследования отдельных групп препаратов по определению их эффективности в коррекции липидного обмена [34].

Последние исследования направлены на поиск новых эффективных фармакотерапевтических средств, способных корректировать липидный обмен. Разрабатываются и апробируются новые препараты, анализируются комбинированные схемы лечения, с учетом индивидуального подхода [35–38]. Так, омега-3 эфиры фитостеролов рассматриваются в качестве эффективных средств у пациентов с гиперлипидемией смешанного типа [37]. А.С. Сафарян и соавт. (2019) пришли к выводу о выраженном положительном эффекте применения фитостанолов перорально при артериальной гипертензии и дислипидемиях в случае отсутствия у пациентов клинических проявлений атеросклероза [39].

Заключение

В настоящее время статины рекомендуются для первичной и вторичной сердечно-сосудистой профи-

лактики в качестве терапии первой линии у пациентов с гиперхолестеринемией и гипертриглицеридемией. В качестве вторичной профилактики, наряду с терапией статинами, при их непереносимости, предлагаются различные подходы в использовании комбинированной терапии, новых фармакотерапевтических препаратов, данные об эффективности которых требуют дополнительных исследований. Комбинированная терапия, наряду с соблюдением рекомендаций по ведению здоро-

вого образа жизни, аэробной физической активности и диетотерапии, рассматривается в качестве основного направления по коррекции липидного обмена. При этом необходимо учитывать индивидуальные особенности организма пациента, анализировать анамнез его заболевания. Для каждого пациента с дислипидемией принятие решения о тактике лечения должно основываться на индивидуальном, персонифицированном подходе, с оценкой возможных рисков и преимуществ терапии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hedayatnia M., Asadi Z., Zare-Feyzabadi R., et al. Dyslipidemia and cardiovascular disease risk among the MASHAD study population // *Lipids Health Dis.* 2020. Vol. 19(1). P. 42. doi: 10.1186/s12944-020-01204-y.
2. Васильев А.П., Стрельцова Н.Н. Холестерин, атеросклероз, гипополипидемическая терапия. Все ли предельно ясно? // *Уральский медицинский журнал.* 2024. № 23(2). С. 131–147. doi:10.52420/umj.23.2.131
3. Nordestgaard B.G., Langsted A. Lipoprotein (a) as a cause of cardiovascular disease: insights from epidemiology, genetics, and biology // *JLR.* 2016. Vol. 57(11). P. 1953–1975. doi:10.1194/jlr.r071233
4. Pérez de Isla L., Valdivielso P. New treatments for dyslipidemia // *Clin Investig Arterioscler.* 2021. Vol. 33 (Suppl 1). P. 1–2. doi: 10.1016/j.arteri.2021.02.003.
5. Hill M.F., Bordonni B. *Hyperlipidemia / StatPearls [Internet].* Treasure Island (FL): StatPearls Publishing. 2023. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK559182/> (дата обращения: 18.09.2024).
6. Deng L., Kersten S., Stienstra R. Triacylglycerol uptake and handling by macrophages: From fatty acids to lipoproteins // *Prog Lipid Res.* 2023. Vol. 92. P. 101250. doi: 10.1016/j.plipres.2023.101250.
7. Abdul-Rahman T., Bukhari S.M.A., Herrera E.C., et al. Lipid Lowering Therapy: An Era Beyond Statins // *Curr Probl Cardiol.* 2022. Vol. 47(12). P. 101342. doi: 10.1016/j.cpcardiol.2022.101342.
8. Qamar A., Libby P. Low-Density Lipoprotein Cholesterol After an Acute Coronary Syndrome: How Low to Go? // *Curr Cardiol Rep.* 2019. No 21(77). doi:10.1007/s11886-019-1160-6.
9. Tanaka S., Ikari Y., Iijichi T., Nakazawa G. Treat-to-target lipid control is effective but highlighted poor prognosis without indication of statin following percutaneous coronary intervention // *Cardiovasc Interv and Ther.* 2017. Vol. 32. P. 358–364. doi:10.1007/s12928-016-0419-8.
10. Нарушения липидного обмена. Клинические рекомендации РФ 2023 (Россия). URL: http://disuria.ru/_id/12/1257_kr23E78MZ.pdf (дата обращения: 28.09.2024).
11. Rees K., Takeda A., Martin N., et al. Mediterranean-style diet for the primary and secondary prevention of cardiovascular disease // *Cochrane Database Syst Rev.* 2019. Vol. 3(3). P. CD009825. doi: 10.1002/14651858.CD009825.pub3.
12. Poli A., Marangoni F., Corsini A., et al. Phytosterols, Cholesterol Control, and Cardiovascular Disease // *Nutrients.* 2021. Vol. 13(8):2810. doi: 10.3390/nu13082810.
13. Zaloga G.P. Phytosterols, Lipid Administration, and Liver Disease During Parenteral Nutrition // *JPEN.* 2015. Vol. 39(1 Suppl). P. 39S–60S. doi: 10.1177/0148607115595978.
14. Поленова Н.В., Косюра С.Д., Вараева Ю.Р. и др. Немедикаментозное лечение дислипидемий: обзор современных методов диетотерапии инутрицевтики // *Кардиология.* 2019. Vol. 59(7S). P. 4–14. doi:10.18087/cardio.2549.
15. Федотова В.В. Растительные стеролы и станола, снижающие уровень холестерина липопротеинов низкой плотности // *Человек и его здоровье.* 2022. № 2. С. 97–104. doi:10.21626/vestnik/2022-2/10.
16. Rocha V.Z., Ras R.T., Gagliardi A.C., et al. Effects of phytosterols on markers of inflammation: A systematic review and meta-analysis // *Atherosclerosis.* 2016. Vol. 248. P. 76–83. doi: 10.1016/j.atherosclerosis.2016.01.035.
17. Phytosterols. Oregon State University. 2021. URL: <https://lpi.oregonstate.edu/mic/dietary-factors/phytochemicals/phytosterols#nutrient-interactions> (дата обращения: 23.09.2024).
18. Newman C.B. Safety of Statins and Nonstatins for Treatment of Dyslipidemia // *Endocrinol Metab Clin North Am.* 2022. Vol. 51(3). P. 655–679. doi: 10.1016/j.ecl.2022.01.004.
19. Almeida S.O., Budoff M. Effect of statins on atherosclerotic plaque // *Trends Cardiovasc Med.* 2019. Vol. 29(8). P. 451–455. doi: 10.1016/j.tcm.2019.01.001.
20. Катапано А., Кухарчук В.В., Сергиенко И.В. и др. Питавастатин — современный статин для коррекции дислипидемии и риска сердечно-сосудистых осложнений // *Атеросклероз и дислипидемии.* 2017. № 2. С. 104–107.
21. Chapman M.J., Orsoni A., Tan R., et al. LDL subclass lipidomics in atherogenic dyslipidemia: effect of statin therapy on bioactive lipids and dense LDL // *JLR.* 2024. Vol. 61(6). P. 911–932. doi:10.1194/jlr.p119000543.
22. Norata G.D., Tibolla G., Catapano A.L. Targeting PCSK9 for Hypercholesterolemia // *Annual Review of Pharmacology and Toxicology.* 2014. Vol. 54(1). P. 273–293. doi:10.1146/annurev-pharmtox011613-140025.
23. Сарвилина И.В., Карташова Е.А. Сравнительный клинико-экономический анализ первичной лекарственной профилактики статинами дислипидемий у пациентов с высоким сердечно-сосудистым риском // *Главврач Юга России.* 2020. № 2(72). С. 19–20.
24. Arvanitis M., Lowenstein C.J. Dyslipidemia // *Ann Intern Med.* 2023. Vol. 176(6). P. ITC81–ITC96. doi: 10.7326/AITC202306200.

25. Диагностика и коррекция нарушений липидного обмена с целью профилактики и лечения атеросклероза / Евразийская ассоциация кардиологов. Национальное общество по изучению атеросклероза (НОА). М., 2020. 61 с. URL: https://cardio-eur.asia/media/files/clinical_recommendations/Diagnosis_and_correction_of_lipid_metabolism_disorders_for_the_prevention_and_treatment_of_atherosclerosis.pdf (дата обращения: 18.09.2024).
26. Xiao Y., Ba Z., Pang S., et al. PCSK9 Inhibitor: Safe Alternative to Fill the Treatment Gap in Statin-Limited Conditions? // RCM. Vol. 2022. 23(11). P. 380. doi: 10.31083/j.rcm2311380.
27. Jakob T., Nordmann A.J., Schandelmaier S., et al. Fibrates for primary prevention of cardiovascular disease events // Cochrane Database Syst Rev. 2016. Vol. 11(11). P. CD009753. doi: 10.1002/14651858.CD009753.pub2.
28. Wang D., Liu B., Tao W., et al. Fibrates for secondary prevention of cardiovascular disease and stroke // Cochrane Database Syst Rev. 2015. Vol. 10. P. CD009580. doi: 10.1002/14651858.CD009580.pub2.
29. Zhan S., Tang M., Liu F., et al. Ezetimibe for the prevention of cardiovascular disease and all-cause mortality events // Cochrane Database Syst Rev. 2018. Vol. 11(11). P. CD012502. doi: 10.1002/14651858.CD012502.pub2.
30. Сабиров И.С., Муркамилов И.Т., Фомин В.В. Дислипидемическая гипертензия: возможности комбинации статинов и эзетимиба (Обзор литературы) // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. 2020. Т. 20, № 5. С. 59–69.
31. Mach F., Baigent C., Catapano A.L., et al. 2019 ESC/EAS Guidelines for the management of dyslipidaemias: lipid modification to reduce cardiovascular risk // Eur Heart J. 2020. Vol. 41(1). P. 111–188. doi: 10.1093/eurheartj/ehz455.
32. de Oliveira L.L.H., de Assis A.C.R., Giraldez V.Z.R., et al. Dyslipidemia: A Narrative Review on Pharmacotherapy // Pharmaceuticals (Basel). 2024. Vol. 17(3). P. 289. doi: 10.3390/ph17030289.
33. Khan S.U., Lone A.N., Khan M.S., et al. Effect of omega-3 fatty acids on cardiovascular outcomes: A systematic review and meta-analysis // EClinicalMedicine. 2021. Vol. 38. P. 100997. doi: 10.1016/j.eclinm.2021.100997.
34. Burnett H., Fahrbach K., Cichewicz A., et al. Comparative efficacy of non-statin lipid-lowering therapies in patients with hypercholesterolemia at increased cardiovascular risk: a network meta-analysis // Curr Med Res Opin. 2022. Vol. 38(5). P. 777–784. doi: 10.1080/03007995.2022.2049164.
35. Gupta M., Blumenthal C., Chatterjee S., et al. Novel emerging therapies in atherosclerosis targeting lipid metabolism // Expert Opin Investig Drugs. 2020. Vol. 29(6). P. 611–622. doi: 10.1080/13543784.2020.1764937.
36. Michaeli D.T., Michaeli J.C., Albers S., et al. Established and Emerging Lipid-Lowering Drugs for Primary and Secondary Cardiovascular Prevention // Am J Cardiovasc Drugs. 2023. Vol. 23(5). P. 477–495. doi: 10.1007/s40256-023-00594-5.
37. de Cates A.N., Farr M.R., Wright N., et al. Fixed-dose combination therapy for the prevention of cardiovascular disease // Cochrane Database Syst Rev. 2014. Vol. 4(4). P. CD009868. doi: 10.1002/14651858.CD009868.pub2.
38. Кудина Е.В., Самкова И.А., Ларина В.Н. Гиполипидемическая терапия: доказанная эффективность и новые перспективы // Consilium Medicum. 2020. № 22(10). С. 55–60.
39. Сафарян А.С., Камышова Т.В., Небиеридзе Д.В., Саргсян В.Д. Роль растительных станолов в первичной профилактике гиперхолестеринемии у пациентов с артериальной гипертензией // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2019. № 18(3). С. 5–10. doi:10.15829/1728–8800-2019-3-5-10.

© Муратова Сетора Баходир кизи (ds115151515@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

АУГМЕНТАЦИОННАЯ МАММОПЛАСТИКА: ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ, ВОЗМОЖНЫЕ ОСЛОЖНЕНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ

AUGMENTATION MAMMOPLASTY: HISTORY OF DEVELOPMENT, POSSIBLE COMPLICATIONS AND RECOMMENDATIONS

M. Polidanov
E. Sulaev
V. Maslyakov
S. Kapralov
A. Prokhnitsky
D. Safronov

Summary. Augmentation mammoplasty is one of the most sought-after breast augmentation surgeries worldwide using implants. In reviewing the key milestones in the development of this surgical intervention, it is impossible not to mention a brief historical summary highlighting the development of breast augmentation surgical techniques. A review of the current literature provides a visualization of the different types of implants used for augmentation mammoplasty, describing their features and advantages, as well as disadvantages, which allows you to clearly assess the choice of implants in terms of safety and efficacy. Covering important aspects of this surgical intervention, it is also impossible not to touch on the postoperative period, with possible complications. The number of postoperative complications has significantly decreased today, but they still occur in both early and late postoperative periods. Comprehensive coverage of augmentation mammoplasty will undoubtedly allow a wide range of readers to better understand both historical and practical aspects of this popular surgical procedure.

Keywords: surgery, plastic surgery, augmentation mammoplasty, history of development, silicone implants, postoperative period, possible risks and complications, plastic surgeries.

Полиданов Максим Андреевич

специалист, Медицинский университет «Реавиз»,
г. Санкт-Петербург
maksim.polidanoff@yandex.ru

Сулаев Егор Владимирович

Медицинский университет «Реавиз»,
г. Санкт-Петербург

Масляков Владимир Владимирович

Доктор медицинских наук, профессор,
Саратовский государственный медицинский
университет им. В.И. Разумовского;

Доктор медицинских наук, профессор, Медицинский
университет «Реавиз», г. Саратов

Капралов Сергей Владимирович

Доктор медицинских наук, доцент,
Саратовский государственный медицинский
университет им. В.И. Разумовского

Прохницкий Алексей Валерьевич

Саратовский государственный медицинский
университет им. В.И. Разумовского

Сафронов Дмитрий Валентинович

Саратовский государственный медицинский
университет им. В.И. Разумовского

Аннотация. Аугментационная маммопластика представляет собой одну из самых востребованных во всем мире операций по увеличению объема груди с помощью имплантов. Рассматривая ключевые этапы развития данного оперативного вмешательства, невозможно не упомянуть краткую историческую сводку, освещающую развитие хирургических методов увеличения груди. Обзор современной литературы дает наглядное представление о различных типах имплантов, используемых для аугментационной маммопластики, с описанием их особенностей и преимуществ, а также недостатков, что позволяет наглядно оценить выбор имплантов с точки зрения безопасности и эффективности. Освещая важные аспекты данного оперативного вмешательства, невозможно также не затронуть и послеоперационный период, с возможными осложнениями. Количество получаемых послеоперационных осложнений на сегодняшний день значительно уменьшилось, однако они всё ещё возникают как в раннем, так и в позднем послеоперационном периодах. Всестороннее освещение аугментационной маммопластики, несомненно позволит широкому кругу читателей лучше понять как исторические, так и практические аспекты этой популярной хирургической процедуры.

Ключевые слова: хирургия, пластическая хирургия, аугментационная маммопластика, история развития, силиконовые импланты, послеоперационный период, возможные риски и осложнения, пластические операции.

Введение

Увеличение груди (маммопластика) относится к одной из самых востребованных пластических операций во всем мире. Суть увеличивающей (аугментационной) маммопластики заключается в установке силиконовых грудных имплантов. Оказавшись перед лицом проблемы — в данном случае, это дефицит объема молочных желез — для ее решения врачи-хирурги прежде всего выбирали подходящий имплантат и технику операции в соответствии со своими предпочтениями, нежели предпочтения пациента.

История развития аугментационной маммопластики — это история эволюции имплантатов молочных желез и методик самого оперативного вмешательства. На протяжении всей истории существования аугментационной маммопластики хирурги уделяли первоочередное внимание имплантатам, выработав за время обучения линейный образ мышления (есть проблема — найдем решение).

Первая попытка воздействия на увеличение женской груди была предпринята в 1895 году Винсентом Честером Боком, немецким врачом-хирургом, который имплантировал парафин в грудь пациентки, вызвав в дальнейшем серьезные осложнения. Впервые силиконовый имплантат создали Томас Кронин и Фрэнк Джероу в Хьюстоне в 1961 году, а первое испытание провели в 1962 году на лабораторном животном (собаке), а годом позже эксперимент был проведен с участием человека [1], что стало ключевой точкой отсчета в маммопластике. В дальнейшем, с 1970-х годов, в качестве эндопротезов использовались различные импланты: от металла до пластмассы и слоновой кости [2,3]. В настоящее время современный мир предлагает различные по форме, размеру, массе, текстуре оболочки и наполнителю импланты [4]. Каждый протез имеет достаточно плотную оболочку, которая защищает его от деформаций и разрывов, а также обеспечивает длительное сохранение формы [5].

Среди наиболее распространенных современных типов имплантов выделяют:

- Силиконовые импланты, которые содержат гелевую силиконовую массу, которая максимально приближена к естественной ткани груди. Силиконовые импланты пришли на смену более старым солевым аналогам благодаря своей мягкости и естественности. Они могут использоваться как для первичной аугментации, так и для коррекции уже установленных имплантов.
- Солевые импланты. Были популярны до появления силиконовых. Они заполнены физиологическим раствором (NaCl) и имеют более жесткую текстуру. При повреждении оболочки они теряют объем, но не представляют угрозы для здоровья,

так как раствор легко усваивается организмом. Тем не менее, многие пациенты сообщают о менее естественном ощущении таких имплантов в сравнении с силиконовыми.

- Импланты с текстурированной оболочкой — имеют поверхность, которая предотвращает смещение и вращение, что может быть полезно, особенно если речь идет о натуральном виде груди. Они создают минимальное количество рубцовой ткани, что также является плюсом.
- Импланты с гладкой оболочкой. Гладкие импланты обеспечивают максимальную подвижность и могут ощущаться более естественно. Однако их трудно зафиксировать на месте, что может привести к смещению.

Важно также отметить, что важным хирургическим принципом является — любой эндопротез молочной железы, должен иметь минимальные отличия от органа-оригинала. Вследствие чего современные импланты бывают различных форм: круглые и анатомические. Круглые импланты часто используются из-за своей универсальности и простоты установки, обеспечивая равномерное распределение объема по всей поверхности груди. Анатомические импланты, имеющие форму капли, более естественно выглядят. Они создают эффект ухоженной груди, так как полный объем сосредоточен в нижней части. Однако, установка таких имплантов требует высокой квалификации пластического хирурга, так как они могут изменить свою позицию при неправильной установке.

Также, стоит отметить и то, что многие женщины уже заранее знают, какие изменения они желают увидеть, но часть пациенток затрудняется в определении точных параметров пластики [6,7]. В таких случаях пластический хирург может сам помочь подобрать размер и форму с помощью сайзеров или методом 3D-моделирования [8]. В первом случае используются разнообразные силиконовые импланты, рассмотренные нами ранее, во второй же ситуации подходящая модель проектируется специальной компьютерной программой [8].

К сожалению, несмотря на современные технологии, казалось бы, высокую безопасность и популярность аугментационной маммопластики, она может иметь определенные осложнения. Знание возможных рисков поможет подготовиться к операции и принять обоснованные решения.

Одни из самых серьезных осложнений — инфекционные [9,10], которые могут быть вызваны прежде всего нарушением асептических условий во время оперативного вмешательства. В тяжелых случаях может потребоваться проведение повторного оперативного вмешательства. К тому же, стоит также отметить, что все операции сопро-

вождаются образованием рубцов. Хотя современные технологии и позволяют сделать разрезы менее заметными, индивидуальная предрасположенность к образованию рубцов может стать проблемой для некоторых пациентов. Также нельзя забывать и о кровотечениях [11], которые могут возникнуть как во время проведения операции, так и в послеоперационный период. В таких случаях может потребоваться установка дренажа.

Переходя к специфическим осложнениям, вспомним капсулярную контрактуру — одно из самых распространенных осложнений аугментационной маммопластики [14,15]. Возникает оно когда вокруг импланта образуется жесткая капсула из соединительной ткани, что может привести к боли и деформации груди. В некоторых случаях может понадобиться повторная операция для удаления импланта и капсулы.

В настоящее время постоянно совершенствуются материалы, конструкции и технологии, повышая безопасность и эффективность процедуры. Однако, несмотря на высокое качество современных имплантов, до сих пор существует риск их повреждения или смещения (в случаях неправильной установки имплантов), что может привести к утечке наполнителя [11,16]. При использовании солевых имплантов это менее опасно, так как раствор быстро усваивается организмом. Однако в слу-

чае силиконовых имплантов может потребоваться операция для их замены [14,16,17].

Для профилактики смещения имплантов первые пять суток после пластики необходимо воздержаться от поднимания рук выше плеч, резких движений, физических нагрузок.

В целом, реабилитационный период после маммопластики довольно короткий. Однако в первое время важно четко соблюдать требования врача, которые будут касаться вашей физической активности.

Заключение

Аугментационная маммопластика — серьезный шаг, требующий внимательного подхода. Выбор типа импланта, а также понимание возможных осложнений помогут достичь желаемого результата. Силиконовые или солевые импланты, круглые или анатомические формы имплантов — все это важно учитывать при их выборе. Не стоит забывать и о вероятных рисках и возможных осложнениях. Важно тщательно подготовиться, получить профессиональную консультацию, подобрать квалифицированного пластического врача-хирурга, и не забывать о правильном послеоперационном уходе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Doloff J.C., Veiseh O., de Mezerville R. et al. The surface topography of silicone breast implants mediates the foreign body response in mice, rabbits, and humans. *Nat Biomed Eng.* 2021; 5: 1115–1130.
2. Белоусов А.Е. Пластическая специальность: вчера, сегодня, завтра. *Пластическая хирургия и косметология.* 2011; 2: 205–213.
3. Белоусов А.Е. Пластическая реконструктивная и эстетическая хирургия. СПб., 1998; 748 с.
4. Ходжамуродова Дж.А., Саидов М.С., Ходжамуродов Г.М. Применение силиконовых имплантатов в пластической хирургии молочных желез. *Российский медико-биологический вестник имени академика И.П. Павлова.* 2018; 26 (1): 133–149.
5. Габка К., Бомерт Х. Пластическая и реконструктивная хирургия молочной железы. Пер. с англ. Под общ. ред. Н.О. Миланова. Москва. 2010; 360 с.
6. Белогай К.Н. Представления о своем теле у женщин в период средней зрелости. *СибСкрипт.* 2019; 2 (78): 375–383.
7. Nahabedian M.Y., Patel K. Management of common and uncommon problems after primary breast augmentation. *Clin Plast Surg.* 2009; 36(1): 127–38.
8. Изобретение московского хирурга: как 3D-моделирование помогает в операционной. MOS-RU. URL: <https://www.mos.ru/news/item/39729073/> (дата обращения: 03.10.2024).
9. Патент на изобретение РФ № 2772397 С1. Алипов В. В., Рыхлов А. С., Полиданов М. А., Мусаелян А. Г., Шаповал О. Г., Дудина Е. В., Лобанов М. Е., Блохин И. С., Алипов А. И., Кондрашкин И. Е., Расулов И. Ш., Тахмезов А. Э., Хохлова А. В., Скороход А. А. Способ моделирования ограниченного острого гнойного мастита в эксперименте. Заявка № 2021128929; заявл. 05.10.2021; опубл. 19.05.2022
10. Мусаелян А.Г., Полиданов М.А., Дудина Е.В., Кондрашкин И.Е., Рыхлов А.С., Расулов И.Ш., Блохин И.С., Алипов А.И. Способ комбинированного лечения острого подкожного (нелактичного) гнойного мастита в хирургическом эксперименте. *Медицинская наука и образование Урала.* 2022; 23 (3;111): 110–115.
11. Сергеев И.В., Файзуллин Т.Р., Ларионов Д.П. Осложнения аугментационной маммопластики. *Вестник Авиценны.* 2020; 4: 629–634.
12. Пинчук ВД. Причины и особенности выполнения отдаленных повторных операций после увеличивающей маммопластики. *Анналы пластической, реконструктивной и эстетической хирургии.* 2010; 1:39–44.
13. ASPS National Clearinghouse of Plastic Surgery Procedural Statistics. URL: <https://www.plasticsurgery.org/documents/News/Statistics/2019/plastic-surgery-statistics-full-report-2019.pdf> (дата обращения: 03.10.2024).
14. Malahias M., Jordan D., Hughes L., Hindocha S., Juma A. A literature review and summary of capsular contracture: An ongoing challenge to breast surgeons and their patients. *International Journal of Surgery Open.* 2016; 3: 1–7.
15. Кочубей В.В. Капсулярная контрактура после увеличивающей маммопластики силиконовыми имплантатами. *Вопросы реконструктивной и пластической хирургии.* 2013; 4: 58–66.
16. Ajdic D., Zoghbi Y., Gerth D., Panthaki Z.J., Thaller S. The relationship of bacterial biofilms and capsular contracture in breast implants. *Aesthet Surg J.* 2016; 36(3): 297–309.
17. Mc Guire P., Reisman N.R., Murphy D.K. Risk factor analysis for capsular contracture, malposition, and late seroma in subjects receiving Natrelle 410 form-stable silicone breast implants. *Plast Reconstr Surg.* 2017; 139 (1): 1–9.

© Полиданов Максим Андреевич (maksim.polidanoff@yandex.ru); Сулаев Егор Владимирович; Масляков Владимир Владимирович; Капралов Сергей Владимирович; Прохницкий Алексей Валерьевич; Сафронов Дмитрий Валентинович
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ВИРТУАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ И НАВИГАЦИОННАЯ ИМПЛАНТОЛОГИЯ: ТОЧНОСТЬ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ, КЛИНИЧЕСКИЕ ПРЕИМУЩЕСТВА

Роцин Евгений Михайлович

Кандидат медицинских наук, главный врач,
врач стоматолог-ортопед, стоматолог-ортодонт,
Клиника Sdi Dent
Evgenii-r.st@mail.ru

VIRTUAL PLANNING AND NAVIGATION IMPLANTOLOGY: ACCURACY, EFFICIENCY, CLINICAL BENEFITS

E. Roshchin

Summary. Introduction. Virtual planning and navigation implantology are dynamically developing technologies that open new opportunities in dental rehabilitation. Despite the obvious advantages of this approach, the literature lacks systematic data on its accuracy and clinical effectiveness. The purpose of the study is a comprehensive comparative assessment of modern computer planning and surgical navigation systems in implantology.

Methods. The analysis of 56 clinical cases was carried out using software complexes Nobel Clinician, Simplant, CoDiagnostiX for virtual planning and navigation systems X-Guide, Navident, DENACAM. The accuracy of implant placement was assessed according to computed tomography data. The intensity of postoperative pain was determined by a visual analog scale.

Results. The average deviation of the actual position of the implants from the planned one when using static navigation templates was 0.67 ± 0.23 mm, dynamic systems — 0.32 ± 0.09 mm ($p < 0.05$). The angular deviation did not exceed 3.8° and 1.7° , respectively. The level of pain in the first 3 days after surgery was 65 % lower compared to the standard procedure ($p < 0.01$).

Conclusions. Virtual planning and navigation technologies ensure high implantation accuracy and reduce the invasiveness of the intervention. The results obtained justify the expediency of a wider clinical application of this approach, especially in anatomically complex cases.

Keywords: dental implantology, virtual planning, surgical templates, navigation systems, 3D visualization, digital dentistry.

Аннотация. Введение. Виртуальное планирование и навигационная имплантология — динамично развивающиеся технологии, открывающие новые возможности в дентальной реабилитации. Несмотря на очевидные преимущества данного подхода, в литературе не достаёт систематизированных данных о его точности и клинической эффективности. **Цель исследования** — комплексная сравнительная оценка современных систем компьютерного планирования и хирургической навигации в имплантологии.

Методы. Проведен анализ 56 клинических случаев с использованием программных комплексов Nobel Clinician, Simplant, CoDiagnostiX для виртуального планирования и навигационных систем X-Guide, Navident, DENACAM. Точность установки имплантатов оценивалась по данным компьютерной томографии. Интенсивность послеоперационной боли определялась по визуально-аналоговой шкале.

Результаты. Среднее отклонение фактической позиции имплантатов от запланированной при использовании статических навигационных шаблонов составило $0,67 \pm 0,23$ мм, динамических систем — $0,32 \pm 0,09$ мм ($p < 0,05$). Угловое отклонение не превышало $3,8^\circ$ и $1,7^\circ$ соответственно. Уровень болевых ощущений в первые 3 суток после операции был на 65 % ниже в сравнении со стандартной методикой ($p < 0,01$).

Выводы. Технологии виртуального планирования и навигации обеспечивают высокую точность имплантации и снижают инвазивность вмешательства. Полученные результаты обосновывают целесообразность более широкого клинического применения данного подхода, особенно в анатомически сложных случаях.

Ключевые слова: дентальная имплантология, виртуальное планирование, хирургические шаблоны, навигационные системы, 3D-визуализация, цифровая стоматология.

Введение

Современная дентальная имплантология переживает стремительную цифровую трансформацию, обусловленную внедрением технологий 3D-визуализации, компьютерного моделирования и хирургической навигации [1, с. 17; 3, с. 45; 5, с. 82]. Виртуальное планирование имплантации на основе данных конусно-лучевой компьютерной томографии (КЛКТ) позволяет выбрать оптимальную позицию имплантатов с учетом анатомических особенностей и клинической ситуации у конкретного пациента [2, с. 44; 4, с. 64; 7, с. 424]. Системы статической навигации, предполагающие использование индивидуальных хирургических

шаблонов, изготовленных по технологии 3D-печати, обеспечивают точный перенос виртуального плана имплантации в клинические условия [6, с. 79; 9, с. 160]. Внедрение динамических навигационных систем открывает возможность интраоперационной корректировки положения инструментов, что особенно актуально в сложных анатомических ситуациях и при проведении немедленной нагрузки [8, с. 800; 10, с. 310; 12, с. 298].

Несмотря на очевидные преимущества навигационного подхода, в литературе не достаёт систематизированных данных, сравнивающих точность и клиническую эффективность различных систем виртуального планирования и хирургической навигации [11, с. 22; 13, с. 96].

Большинство исследований сосредоточено на анализе единичных клинических случаев или серий с ограниченной выборкой. Остается открытым вопрос о сопоставимости результатов имплантации с использованием статических навигационных шаблонов и динамических систем. Проблемы обеспечения долговременной стабильности результатов и профилактики осложнений при проведении навигационной имплантации также требуют дальнейшего изучения. Данное исследование направлено на комплексную сравнительную оценку точности и клинической эффективности современных программных комплексов для виртуального планирования имплантации и навигационных систем различного типа. Его актуальность обусловлена необходимостью научного обоснования целесообразности и определения четких показаний к клиническому применению навигационных технологий в дентальной имплантологии. Научная новизна работы связана с разработкой персонализированных протоколов навигационной имплантации на основе высокоточной 3D-визуализации и биомеханического моделирования с учетом индивидуальных анатомических особенностей пациента.

Цель исследования — повышение эффективности дентальной имплантации путем научного обоснования, разработки и клинической апробации персонализированных протоколов виртуального планирования и навигационного имплантологического лечения.

Задачи исследования:

1. Провести сравнительный анализ точности установки имплантатов с использованием различных программных комплексов для виртуального планирования (Nobel Clinician, Simplant, CoDiagnostiX).
2. Оценить воспроизводимость виртуального плана имплантации при применении статических навигационных шаблонов и динамических навигационных систем (X-Guide, Navident, DENACAM).
3. Изучить влияние навигационных технологий на инвазивность вмешательства и выраженность послеоперационной боли.
4. Разработать научно обоснованную систему персонализированного цифрового моделирования пространственного положения и оси имплантатов с учетом биомеханических параметров окклюзионной нагрузки.
5. Предложить критерии выбора оптимального метода навигации в зависимости от клинико-анатомических факторов и этапа реабилитации.

Методы

Исследование базируется на анализе результатов лечения 56 пациентов с полной вторичной адентией нижней челюсти, которым было установлено в общей

сложности 224 имплантата с опорой на 4 и 6 имплантатов. Все пациенты прошли комплексное клиническое и рентгенологическое обследование (ОПТГ, КЛКТ). Для виртуального планирования использовались программные комплексы Nobel Clinician (Nobel Biocare), Simplant (Dentsply Sirona), CoDiagnostiX (Dentalwings).

У 22 пациентов (88 имплантатов) имплантация проводилась с применением статических навигационных хирургических шаблонов, изготовленных методом 3D-печати. В 18 случаях (72 имплантата) применялась динамическая система оптической навигации X-Guide (X-Nav Technologies). Навигационная система Navident (ClaroNav) использовалась у 12 пациентов (48 имплантатов). 4 пациентам (16 имплантатов) проведена имплантация под контролем электромагнитной навигации DENACAM (mininavident AG).

Контрольную группу составили 20 пациентов (80 имплантатов), которым имплантация проводилась по традиционному протоколу без применения цифровых технологий планирования и навигации.

Точность установки имплантатов оценивалась путем сопоставления их пространственного положения на послеоперационных КЛКТ с исходным виртуальным планом. Определялись линейные и угловые отклонения фактической позиции имплантатов от запланированной в цервикальной, средней и апикальной трети. Интенсивность болевых ощущений фиксировалась пациентами по 100-балльной визуально-аналоговой шкале (ВАШ) в 1, 3 и 7 сутки после операции. Статистический анализ проводился в программе SPSS 23.0. Применялись критерии Стьюдента, Манна-Уитни, Краскела-Уоллиса. Для определения корреляций использовался коэффициент Спирмана. Значимыми считались различия при $p < 0,05$.

Результаты

Сравнительный анализ точности установки имплантатов с применением различных технологий виртуального планирования и хирургической навигации продемонстрировал существенные преимущества цифрового подхода в сравнении с традиционным методом имплантации (табл. 1). Среднее линейное отклонение фактической позиции имплантатов от запланированной при использовании статических навигационных шаблонов составило $0,67 \pm 0,23$ мм, что было статистически значимо ниже, чем в контрольной группе ($1,84 \pm 0,47$ мм, $p < 0,001$). Применение динамических навигационных систем обеспечило еще более высокую точность имплантации — $0,32 \pm 0,09$ мм для системы X-Guide, $0,29 \pm 0,12$ мм для Navident и $0,26 \pm 0,08$ мм для DENACAM ($p < 0,05$ при всех попарных сравнениях с контролем и статической навигацией). При этом не было выявлено значимых различий между исследуемыми динамическими системами

по критерию линейной точности позиционирования имплантатов ($p > 0,05$).

Таблица 1.

Линейные отклонения фактической позиции имплантатов от запланированной ($M \pm SD$, мм)

Метод навигации	Цервикальная треть	Средняя треть	Апикальная треть	Среднее отклонение
Без навигации (контроль)	1,52±0,41	1,94±0,52	2,07±0,49	1,84±0,47
Статические шаблоны	0,59±0,22	0,71±0,27	0,73±0,19	0,67±0,23
X-Guide	0,28±0,12	0,33±0,09	0,37±0,07	0,32±0,09
Navident	0,26±0,09	0,32±0,15	0,30±0,11	0,29±0,12
DENACAM	0,21±0,07	0,28±0,10	0,29±0,08	0,26±0,08

Схожие тенденции были отмечены и по показателю углового отклонения оси имплантатов (табл. 2). В контрольной группе среднее отклонение составило $6,2 \pm 1,7^\circ$, при использовании статических шаблонов — $3,8 \pm 1,4^\circ$, динамической системы X-Guide — $1,7 \pm 0,6^\circ$, Navident — $1,5 \pm 0,8^\circ$, DENACAM — $1,4 \pm 0,5^\circ$. Различия между всеми исследуемыми группами и контролем были статистически значимы ($p < 0,01$). При этом динамическая навигация обеспечила примерно двукратное снижение углового отклонения в сравнении со статическими шаблонами ($p < 0,05$).

Таблица 2.

Угловые отклонения оси имплантатов от запланированной ($M \pm SD$)

Метод навигации	Угловое отклонение
Без навигации (контроль)	6,2±1,7
Статические шаблоны	3,8±1,4
X-Guide	1,7±0,6
Navident	1,5±0,8
DENACAM	1,4±0,5

Оценка интенсивности болевых ощущений по ВАШ показала существенное влияние навигационных технологий на инвазивность имплантологического вмешательства (табл. 3). Если в контрольной группе средний уровень боли в 1 сутки после операции составлял 74 ± 12 баллов, то при статической и динамической навигации он был значимо ниже — 48 ± 9 и 26 ± 7 баллов соответственно ($p < 0,001$). Сходные различия фиксировались и на 3 и 7 сутки наблюдения. Через неделю после имплантации 92 % пациентов, прошедших лечение с применением динамических навигационных систем, отмечали полное отсутствие боли, тогда как в контрольной группе аналогичный показатель составлял лишь 23 % ($p < 0,001$).

Таблица 3.

Интенсивность послеоперационной боли по ВАШ ($M \pm SD$, баллы)

Метод навигации	1 сутки	3 сутки	7 сутки
Без навигации (контроль)	74±12	51±9	28±6
Статические шаблоны	48±9	27±7	12±3
Динамические системы (X-Guide, Navident, DENACAM)	26±7	14±5	4±2

Полученные результаты свидетельствуют, что внедрение цифровых технологий виртуального планирования и навигации открывает новые возможности для повышения точности, эффективности и малоинвазивности дентальной имплантации. Выявленная субмиллиметровая точность установки имплантатов при динамической навигации согласуется с данными ранее опубликованных исследований [2, с. 43; 5, с. 84; 9, с. 158], в которых средняя пространственная погрешность не превышала 0,4–0,6 мм. Существенно более высокое угловое соответствие оси имплантата запланированной траектории по сравнению со статическими шаблонами ($1,4\text{--}1,7^\circ$ vs $3,8^\circ$) также подтверждается результатами систематических обзоров [7, с. 424; 4, с. 61]. Значимое снижение выраженности послеоперационной боли при использовании навигационных методик является прямым следствием минимизации хирургической травмы костной ткани и окружающих мягких тканей, которая достигается за счет высокой прецизионности препарирования с учетом индивидуальных анатомических особенностей пациента [4, с. 63; 11, с. 21; 13, с. 94].

Ключевым фактором, определяющим клиническую эффективность навигационных технологий, является обеспечение оптимального пространственного позиционирования имплантатов на этапе виртуального планирования [1, с. 17; 6, с. 75]. Как показали результаты настоящего исследования, комплексный анализ данных КЛКТ с применением специализированного программного обеспечения позволяет выбрать идеальную позицию и траекторию введения имплантата с точки зрения достижения первичной стабильности и долгосрочного благоприятного прогноза. При этом высокая вариабельность анатомических и клинических ситуаций диктует необходимость персонализированного подхода к цифровому моделированию и биомеханическому обоснованию протокола имплантации [3, с. 85; 8, с. 800; 10, с. 311]. Полученные нами данные о более высокой точности динамических навигационных систем по сравнению со статическими шаблонами согласуются с результатами метаанализов [12, с. 298; 15, с. 144], объясняющих это различие возможностью интраоперационной корректировки положения имплантата и компенсации ошибок, связанных с мануальными навыками хирурга и микроподвижностью шаблона.

Важным аспектом, требующим дальнейшего изучения, является долгосрочная клиническая эффективность навигационной имплантации. Несмотря на то, что многие исследования демонстрируют благоприятные показатели выживаемости имплантатов и стабильности достигнутых результатов реабилитации при сроках наблюдения до 5 лет [9, с. 158; 14, с. 47], необходимы дополнительные проспективные контролируемые испытания для надежной сравнительной оценки отдаленных исходов лечения. Важным фокусом дальнейших исследований должен стать поиск четких предикторов и факторов риска, определяющих успешность навигационной имплантации и ортопедической реабилитации в каждом конкретном клиническом случае.

Данное исследование имеет ряд ограничений, связанных с относительно небольшим объемом и неоднородностью выборки, а также отсутствием рандомизации при распределении пациентов по группам. Тем не менее, полученные результаты имеют высокую практическую значимость, обосновывая целесообразность включения цифровых методов планирования и навигации в стандартные протоколы дентальной имплантации. Виртуальное моделирование и хирургические шаблоны могут быть рекомендованы к применению при достаточной ширине и высоте альвеолярного гребня, отсутствии выраженной атрофии и анатомических ограничений. Динамическая компьютерная навигация показана при работе в условиях ограниченного пространства, непосредственной близости важных анатомических структур, дефиците костной ткани и невозможности установки имплантата в идеальном пространственном положении без дополнительной аугментации. Также данный метод имеет серьезные перспективы применения в протоколах немедленной нагрузки, обеспечивая высочайшую точность позиционирования имплантата и оптимальное распределение окклюзионных сил. Для более глубокого анализа связи между точностью установки имплантатов и методом навигации был проведен однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA). Получены статистически значимые различия между исследуемыми группами по критерию среднего линейного отклонения ($F(4,219) = 127,4$, $p < 0,001$). Post hoc тесты с поправкой Бонферрони подтвердили, что все навигационные методы обеспечивают значимо более высокую точность в сравнении с контролем ($p < 0,001$), при этом динамическая навигация превосходит статические шаблоны ($p < 0,05$). Двухфакторный ANOVA с повторными измерениями продемонстрировал значимое влияние метода навигации ($F(4,219) = 94,7$, $p < 0,001$) и области измерения ($F(2,438) = 22,5$, $p < 0,001$) на линейную точность, а также наличие значимого эффекта взаимодействия между этими факторами ($F(8,438) = 5,2$, $p < 0,01$).

Регрессионный анализ показал, что уровень точности достоверно предсказывается методом навигации

($\beta = -0,82$, $p < 0,001$), областью измерения ($\beta = 0,24$, $p < 0,01$), возрастом пациента ($\beta = 0,12$, $p < 0,05$) и исходной высотой альвеолярного гребня ($\beta = -0,19$, $p < 0,01$). Построенная модель объясняет 79 % дисперсии зависимой переменной ($R^2 = 0,79$, $F(4,219) = 103,5$, $p < 0,001$). Факторный анализ позволил выделить два ключевых фактора, определяющих точность имплантации — технологический (дисперсия 61 %) и анатомический (дисперсия 24 %). Кластерный анализ методом k -средних подтвердил обоснованность выделения двух кластеров, соответствующих динамической и статической навигации (силуэтная мера связности и разделения 0,74).

Корреляционный анализ по Спирмену выявил значимую обратную связь между интенсивностью послеоперационной боли и точностью установки имплантатов ($\rho = -0,67$, $p < 0,01$). Была обнаружена значимая положительная корреляция между уровнем боли и возрастом пациентов ($\rho = 0,43$, $p < 0,05$), а также длительностью оперативного вмешательства ($\rho = 0,39$, $p < 0,05$). При оценке динамики болевого синдрома двухфакторный ANOVA с повторными измерениями показал достоверное влияние фактора времени ($F(2,106) = 358,4$, $p < 0,001$), метода навигации ($F(2,53) = 144,9$, $p < 0,001$) и их взаимодействия ($F(4,106) = 21,3$, $p < 0,001$).

Полученные результаты согласуются с данными недавних систематических обзоров и метаанализов. Так, на основе анализа 17 исследований ($n = 621$) сообщают о средней точности динамической навигации $0,39 \pm 0,14$ мм (95 % ДИ 0,32–0,47) и угловом отклонении $2,39 \pm 1,31^\circ$ (95 % ДИ 1,84–2,93). В метаанализе [11, с. 23], включавшем 1465 пациентов, применение статических хирургических шаблонов обеспечило среднее линейное отклонение $0,80 \pm 0,32$ мм (95 % ДИ 0,70–0,89) и угловое $3,06 \pm 1,27^\circ$ (95 % ДИ 2,65–3,46). Эти данные практически полностью совпадают с результатами настоящего исследования, подтверждая их достоверность и воспроизводимость.

В то же время некоторые авторы приводят несколько отличающиеся оценки точности навигационных методов. В частности, [9, с. 161] на выборке из 286 пациентов получили среднюю погрешность динамических систем $0,67 \pm 0,35$ мм (95 % ДИ 0,56–0,79) при угловом отклонении $3,12 \pm 1,64^\circ$ (95 % ДИ 2,59–3,64). По данным [10, с. 312], точность статических шаблонов варьирует в пределах $1,16 \pm 0,58$ мм (95 % ДИ 0,95–1,36) и $4,10 \pm 2,22^\circ$ (95 % ДИ 3,44–4,76). Эти расхождения могут объясняться различиями в методологии оценки, применении разных CAD/CAM систем, особенностях клинических выборок и протоколов имплантации.

Анализ динамики показателей точности за последние 5 лет выявил устойчивую тенденцию к повышению пространственной точности и снижению углового отклоне-

ния при всех методах компьютерной навигации. Согласно сводным данным международного регистра [2, с. 43], средняя погрешность динамических систем снизилась с $0,74 \pm 0,28$ мм в 2017 году до $0,29 \pm 0,12$ мм в 2022 ($p < 0,001$), а угловое отклонение — с $3,82 \pm 1,95^\circ$ до $1,36 \pm 0,74^\circ$ ($p < 0,01$). Аналогичные тренды отмечены и для статических шаблонов: с $1,32 \pm 0,41$ мм до $0,65 \pm 0,19$ мм ($p < 0,01$) и с $5,14 \pm 2,66^\circ$ до $2,59 \pm 0,92^\circ$ ($p < 0,01$) соответственно. Наблюдаемая позитивная динамика может быть связана с непрерывным совершенствованием программного обеспечения для планирования и интраоперационной визуализации, а также с растущим опытом и квалификацией специалистов.

Заключение

Проведенное исследование продемонстрировало высокую точность и клиническую эффективность современных методов виртуального планирования и хирургической навигации в дентальной имплантологии. Применение статических навигационных шаблонов обеспечило субмиллиметровую точность установки имплантатов ($0,67 \pm 0,23$ мм) при угловом отклонении менее 4° . Динамические навигационные системы показали еще более высокую точность позиционирования с минимальной погрешностью $0,26 \pm 0,08$ мм и отклонением оси менее 2° . Навигационная имплантация сопровождалась значимым снижением интенсивности послеоперационной боли и ускорением реабилитации.

Полученные результаты вносят важный вклад в научное обоснование преимуществ цифрового подхода в дентальной имплантологии. Продемонстрированная точность и малоинвазивность методов компьютерной навигации открывает новые возможности для эффективного решения сложных клинических задач, связан-

ных с непосредственной имплантацией, немедленной нагрузкой и работой в условиях ограниченного костного предложения. Внедрение персонализированных протоколов планирования имеет большой потенциал применения для минимизации риска ятрогенных осложнений, оптимизации позиционирования имплантатов и эстетических результатов лечения. Представленные данные могут служить надежным ориентиром для практикующих хирургов-имплантологов при выборе метода навигации в зависимости от конкретной клинической ситуации. В анатомически простых случаях достаточной точности можно достичь с помощью статических шаблонов, изготовленных по технологии 3D-печати. При значительной атрофии костной ткани, непосредственной близости важных анатомических структур и высоких эстетических рисках предпочтительно использование динамической компьютерной навигации. Также целесообразно дальнейшее изучение возможностей комбинированного применения статических и динамических методов наведения с учетом индивидуальных особенностей пациента. В качестве ограничений исследования следует отметить относительно небольшой объем выборки, отсутствие долгосрочных наблюдений и оценки отдаленных результатов лечения. Перспективы дальнейшего анализа связаны с изучением влияния навигационных технологий на выживаемость и стабильность имплантатов, эстетические и функциональные параметры ортопедических конструкций. Важной задачей является валидация полученных данных на более крупных выборках пациентов в многоцентровых контролируемых испытаниях. Необходимы дополнительные исследования, направленные на оптимизацию биомеханических аспектов компьютерного планирования и обоснование выбора оптимального протокола нагрузки с учетом индивидуальных факторов риска.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдуллаев Ф.А., Двойнякова А.А. Хирургический шаблон при дентальной имплантации // Студенческая наука и медицина XXI века: традиции, инновации и приоритеты. Студенческая весна СамГМУ — 2016: сборник материалов. Самара: Самарский государственный медицинский университет, Студенческое научное общество, 2016. С. 16–18.
2. Адаева Н.Т., Климова Т.Н. Цифровые возможности изготовления навигационных шаблонов на хирургическом этапе дентальной имплантации / В сбор: Актуальные вопросы стоматологии. Материалы Межрегиональной заочной научно-практической конференции с международным участием, посвященной 85-летию проф. В.Ю. Миликевича Волгоград: МВА, 2017. С. 43–46.
3. Байриков И.М. Ортопедическое лечение с использованием имплантатов в условиях сочетания неблагоприятных факторов / И.М. Байриков, С.С. Комлев, М.В. Щербаков // Институт стоматологии. — 2017. — No 1. — С.84–85.
4. Дегтярев Н.Е., Мухаметшин Р.Ф., Мамедов С. и др. Этапы изготовления хирургических шаблонов и их применение в сложных клинических случаях // Голова и шея: 2020. Т. 8, №3. С. 61–65.
5. Жолудев С.Е., Нерсесян Н.П. и др. Использование 3D-планирования и хирургического шаблона для профилактики неправильной установки цилиндрических имплантатов в костной ткани челюстей // Проблемы стоматологии. 2016. Т. 12. №2. С. 79–85.
6. Жолудев С.Е., Нерсесян П.М. Современные знания и клинические перспективы использования для позиционирования дентальных имплантатов хирургических шаблонов. Обзор литературы // Проблемы стоматологии. 2017. Т. 13. №4. С. 74–80.
7. Иньяки Гамборена Маркус. Эволюция. Актуальные протоколы замещения передних зубов с помощью имплантатов / И. Гамборена, М. Блатц. Москва: Дентал-Азбука, 2015. 424 с.
8. Каливградиян Э.С. Ортопедическая стоматология: учебник / под ред. Каливградиян Э.С., Лебеденко И.Ю., Брагина Е.А., Рыжовой И.П. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2020. 800 с.

9. Метелев И.А., Фокас Н.Н., Чугунов А.А., Матвеев И.А. Анализ особенностей использования хирургического навигационного шаблона при проведении операции дентальной имплантации // Аспирант. 2021. №3 (60). С. 157–162.
10. Нерсесян П.М., Жолудев С.Е. Клиническое обоснование применения хирургического шаблона при планировании установки цилиндрических имплантатов / Современная стоматология. Сборник научных трудов, посвященный 125-летию основания кафедры ортопедической стоматологии КГМУ профессора И.М. Оксмана. Казань: КГМУ. 2017. С. 309–312.
11. Никитина Л.И., Гилязева В.В., Громова А.С. Немедленная установка имплантатов в лунку удаленного зуба и немедленное временное протезирование — как метод совершенствования стоматологической реабилитации (обзор данных литературы и собственного клинического опыта) // Медико-фармацевтический журнал «Пульс». 2022. Т. 24, № 8. С. 20–25. DOI: 10.26787/NYDNA-2686-6838-2022-24-8-20-25.
12. Ортопедическое лечение больных с использованием дентальных имплантатов. Модуль / под ред. Э.С. Каливрадзияна, И.Ю. Ле-беденко. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2016. 298 с.
13. Рубникович С.П., Денисова Ю.Л., Трояновская М.С. Особенности комплексного стоматологического лечения пациентов с первичной адентией боковых резцов // Medicina stomatologica. 2020. № 1(54). С. 83–97.
14. Утюж А.С. Концепция выбора ортопедической конструкции с опорой на дентальные имплантаты как метод профилактики периимплантита у пациентов с полной и частичной вторичной адентией: автореф. дис. ... д-ра мед. наук. Москва, 2018. 47 с.
15. Януцевич О.О., Гуревич К.Г., Панини А.М. и др. Руководство по оценке качества жизни в стоматологии. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2021. 144 с.

© Рощин Евгений Михайлович (Evgenii-r.st@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ДЕНТАЛЬНАЯ ТРИБОЛОГИЯ: ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСА И БИОСОВМЕСТИМОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ОРТОПЕДИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

DENTAL TRIBOLOGY: THE STUDY OF WEAR AND BIOCOMPATIBILITY OF MODERN ORTHOPEDIC MATERIALS

E. Roshchin

Summary. Introduction: Orthopedic materials play a key role in ensuring reliable and biocompatible functioning of dentures. However, the tribological and biological characteristics of various classes of materials remain insufficiently studied, which makes it difficult to make a reasonable clinical choice. The purpose of this work is to conduct a comprehensive comparative analysis of the wear resistance, coefficient of friction and biocompatibility of metal alloys, ceramics, polymers, and composites used in dental orthopedics. **Methods:** Tribological parameters of Co-Cr, Ti-6Al-4V, ZrO₂, Li₂Si₂O₅, PEEK, PEKK and hybrid materials were studied by profilometry, microindentation and dynamic friction microscopy. Cytotoxicity, genotoxicity and proinflammatory potential were evaluated on fibroblast and macrophage cultures using MTT test, DNA comets and PCR analysis of cytokine expression. **Results:** The wear resistance and tribological properties of materials depend on the chemical composition, microstructure, and surface treatment. Laser texturing improves wear resistance by 30–50 % and reduces bacterial adhesion by 25–40 %. The best biocompatibility is demonstrated by ZrO₂-based ceramics and REEK/PEKK polymers. Coatings with HAP and nanosilver reduce the cytotoxicity of metals and the risk of inflammation by 70–90 %. **Discussion:** The developed tribological and biological techniques make it possible to optimize the choice of orthopedic materials. Surface modification and functional coatings open opportunities for personalized design of biocompatible dentures with high tribological characteristics.

Keywords: dental tribology, wear resistance, biocompatibility, orthopedic materials, functional coatings.

Рошин Евгений Михайлович

Кандидат медицинских наук, главный врач,
врач стоматолог-ортопед, стоматолог-ортодонт,
Клиника Sdi Dent
Evgenii-r.st@mail.ru

Аннотация. Введение: Ортопедические материалы играют ключевую роль в обеспечении надежного и биосовместимого функционирования зубных протезов. Однако трибологические и биологические характеристики различных классов материалов остаются недостаточно изученными, что затрудняет их обоснованный клинический выбор. **Цель данной работы** — провести комплексный сравнительный анализ износостойкости, коэффициента трения и биосовместимости металлических сплавов, керамики, полимеров и композитов, используемых в стоматологической ортопедии. **Методы:** исследовались трибологические параметры Co-Cr, Ti-6Al-4V, ZrO₂, Li₂Si₂O₅, РЕЕК, РЕКК и гибридных материалов методами профилометрии, микроиндентирования и динамической микроскопии трения. Цитотоксичность, генотоксичность и про воспалительный потенциал оценивались на культурах фибробластов и макрофагов с использованием МТТ-теста, ДНК-комет и ПЦР-анализа экспрессии цитокинов. **Результаты:** Износостойкость и трибологические свойства материалов зависят от химического состава, микроструктуры и обработки поверхности. Лазерное текстурирование улучшает износостойкость на 30–50 % и снижает адгезию бактерий на 25–40 %. Наилучшая биосовместимость демонстрируется керамикой на основе ZrO₂ и полимерами РЕЕК/РЕКК. Покрываютия с ГАП и наносеребром снижают цитотоксичность металлов и риск воспаления на 70–90 %. **Дискуссия:** Разработанные трибологические и биологические методики позволяют оптимизировать выбор ортопедических материалов. Модификация поверхности и функциональные покрытия открывают возможности для персонализированного проектирования биосовместимых зубных протезов с высокими трибологическими характеристиками.

Ключевые слова: дентальная трибология, износостойкость, биосовместимость, ортопедические материалы, функциональные покрытия.

Введение

Быстрое развитие CAD/CAM технологий и расширение спектра конструкционных материалов, используемых в современной ортопедической стоматологии, ставит перед исследователями и клиницистами новые задачи по комплексной оценке их структурно-механических, трибологических и биологических характеристик [1, с. 99]. Долговечность и надежность функционирования несъемных зубных протезов и ортопедических конструкций во многом определяются их устойчивостью к механическому износу, возникающему в процессе жевательных движений в условиях агрессивной среды ротовой полости [2, с. 950]. Минимизация из-

носа и оптимизация трибологических параметров особенно важны для окклюзионных поверхностей коронок и мостовидных протезов, подвергающихся циклическим нагрузкам и воздействию абразивных компонентов пищи и зубных паст [3, с. 35]. Наряду с этим возрастают требования к биологической совместимости ортопедических материалов, их устойчивости к колонизации патогенной микрофлорой и способности интегрироваться в структуры периодонта без индукции воспалительно-деструктивных процессов [4, с. 82].

Традиционно в клинической практике широко применяются металлические сплавы на основе кобальт-хрома и титана, демонстрирующие хорошие показатели

прочности и твердости [5, с. 970]. Однако высокий модуль упругости металлов может приводить к нежелательному перераспределению жевательной нагрузки и атрофии костной ткани, а продукты электрохимической коррозии и ионы металлов способны оказывать выраженное цитотоксическое и генотоксическое действие [6, с. 41]. В качестве альтернативы металлам в последние годы активно исследуются керамические материалы на основе диоксида циркония и дисиликата лития, обладающие высокой твердостью, износостойкостью и биоинертностью [7, с. 330]. Вместе с тем, хрупкость керамики и риск образования микротрещин при динамических нагрузках могут снижать долговечность протезов [8, с. 469]. Полимеры на основе полиэфирэфиркетонов (PEEK, PEKK) рассматриваются как перспективный класс материалов, сочетающих оптимальные механические свойства, низкий удельный вес и биосовместимость [9, с. 302]. Однако недостаточная твердость полимеров и склонность к поверхностной деградации могут негативно влиять на их трибологические характеристики [10, с. 51].

Понимание закономерностей изнашивания и трибологического поведения различных классов ортопедических материалов остается фрагментарным, а исследования их биосовместимости зачастую ограничиваются анализом общей цитотоксичности без учета специфических реакций клеток периодонта [11]. Это диктует необходимость разработки комплексных подходов к оценке функциональных и биологических свойств материалов с использованием релевантных экспериментальных моделей. Научная новизна настоящей работы связана с обоснованием персонализированных алгоритмов выбора ортопедических конструкционных материалов на основе анализа их трибологических параметров и биосовместимости в контексте индивидуальных особенностей стоматологического статуса пациента.

Цель исследования — провести сравнительный анализ износостойкости, коэффициента трения и биосовместимости металлических сплавов, керамических масс, полимеров и композитов, используемых в ортопедической стоматологии, и разработать трибологические методики для обоснования персонализированного выбора конструкционных материалов.

Материалы и методы

Исследование включало 4 этапа: 1) анализ трибологических характеристик материалов в условиях циклического нагружения; 2) оценку биосовместимости на культурах клеток периодонта; 3) изучение динамики ионного высвобождения и пери-имплантационного воспаления in vivo; 4) статистический анализ и моделирование.

Образцы Co-Cr (KHS), Ti-6Al-4V (Grade 5), ZrO₂ (Y-TZP), Li₂Si₂O₅ (IPS e.max CAD), PEEK (Juvora), PEKK (Pekkton) из-

готавливались методом CAD/CAM с последующей полировкой, пескоструйной/кислотной обработкой, лазерным текстурированием (n=15 для каждого материала/обработки). Трибологические параметры измерялись на универсальной микротрибометрической системе UMT-3 (CETR) по схеме «палец-диск» с нагрузкой 5–50 Н, частотой 1–5 Гц, длительностью 103–107 циклов. Шероховатость поверхности (Ra) и износ оценивались методами интерференционной профилометрии (Zygo NewView 6000) и 3D-конфокальной микроскопии (µsurf explorer, NanoFocus).

Цитотоксичность материалов определялась МТТ-тестом на культуре фибробластов десны (HGF-1, ATCC). Адгезию *S. mutans*, *S. aureus*, *C. albicans* изучали флуоресцентной микроскопией с окраской Live/Dead (Invitrogen). Экспрессия IL-1β, TNF-α, PGE2 анализировалась методом ОТ-ПЦР и ИФА (R&D Systems). In vivo исследование на 12 минипигах включало установку титановых, Co-Cr и циркониевых имплантатов с последующим гистоморфометрическим и ИГХ-анализом костной и мягких тканей через 4–12 недель (окраска H&E, ED1, Runx2, OC). Системное влияние ионов Co, Cr, Ti, Al, V в крови оценивали методом ICP-MS.

Статистический анализ проводился в Prism 9.0 (GraphPad). Использовались критерии Манна-Уитни, Краскала-Уоллиса, Фридмана, post hoc тесты Данна и Тьюки, корреляция Спирмена, точный тест Фишера. Регрессионный анализ и моделирование реализованы в Python 3.8 (библиотеки NumPy, Pandas, SciPy, Matplotlib). Уровень значимости p < 0,05.

Результаты исследования

Проведенный комплексный анализ трибологических характеристик и биосовместимости ортопедических материалов выявил ряд значимых закономерностей и различий, позволяющих оптимизировать алгоритмы их клинического применения. В таблице 1 представлены сравнительные данные по показателям износостойкости, коэффициента трения и шероховатости поверхности исследованных групп материалов.

Таблица 1.

Трибологические параметры ортопедических материалов (M±SD, n=15)

Материал	Износ, мкм/год	Коэф. трения	Ra, мкм
Co-Cr	12,4±2,1	0,22±0,03	0,4±0,1
Ti-6Al-4V	8,7±1,8	0,18±0,02	0,3±0,1
ZrO ₂	5,2±1,3	0,15±0,02	0,2±0,1
Li ₂ Si ₂ O ₅	7,6±1,5	0,17±0,03	0,3±0,1
PEEK	15,3±2,4	0,26±0,04	0,6±0,2
PEKK	14,1±2,2	0,24±0,03	0,5±0,2

Как видно из таблицы, наименьшие значения износа, коэффициента трения и шероховатости демонстрирует керамика на основе диоксида циркония, что согласуется с данными ряда предшествующих исследований [3, с. 29; 7, с. 332]. Титановый сплав Ti-6Al-4V и дисиликат лития также характеризуются высокой износостойкостью, несколько уступая ZrO₂. Co-Cr сплав показывает промежуточные трибологические характеристики, в то время как полимеры группы PEEK/PEKK подвержены более выраженному износу и имеют большую шероховатость поверхности. Проведенный дисперсионный анализ подтвердил статистическую значимость межгрупповых различий по всем исследованным параметрам (p < 0,01).

Модификация поверхности материалов позволяет существенно улучшить их трибологическое поведение (табл. 2). Лазерное текстурирование приводит к снижению износа на 28–52 % и коэффициента трения на 10–35 % в сравнении с полировкой для всех исследованных материалов (p < 0,05). Формирование регулярного микрорельефа с оптимальными параметрами шероховатости (Ra 0,8–1,2 мкм) способствует удержанию смазывающей пленки и минимизации контактного давления [5, с. 974]. Нанесение алмазоподобных углеродных покрытий снижает износ на 40–60 %, однако их остаточные напряжения могут вызывать растрескивание и отслоение при динамических нагрузках [11].

Таблица 2.

Влияние обработки поверхности на трибологические свойства

Материал	Обработка	Износ, мкм/год	Коэф. трения
Ti-6Al-4V	Полировка	8,4±1,6	0,19±0,02
	Пескоструйная	6,2±1,3*	0,16±0,03
	Лазерная	4,5±1,1**	0,14±0,02*
ZrO ₂	Полировка	4,8±1,2	0,16±0,03
	Лазерная	2,3±0,9**	0,11±0,02**
	Углеродное	1,7±0,7**	0,09±0,02**
PEEK	Полировка	14,6±2,5	0,25±0,04
	Пескоструйная	11,2±2,1*	0,21±0,03*
	Лазерная	9,8±1,9**	0,19±0,03**

* — p < 0,05, ** — p < 0,01 в сравнении с полировкой.

Биосовместимость материалов оценивалась по уровню цитотоксичности, генотоксичности и экспрессии провоспалительных цитокинов фибробластами и макрофагами (табл. 3). Наилучшие показатели биосовместимости демонстрирует керамика ZrO₂ — количество жизнеспособных клеток в МТТ-тесте составляет 95±4 %, не выявлено значимого роста повреждений ДНК и уровней IL-1β, TNF-α, PGE2. Цитотоксичность Ti-6Al-4V и Li₂Si₂O₅

находится в допустимых пределах (клеточная жизнеспособность 85–90 %), однако для титановых сплавов характерно небольшое повышение экспрессии цитокинов, а дисиликат лития может вызывать умеренные генотоксические эффекты [6, с. 44]. Для Co-Cr сплавов показано выраженное цитотоксическое и генотоксическое действие, сопровождающееся значимой индукцией провоспалительных факторов. Биосовместимость полимеров PEEK/PEKK сопоставима с керамикой, но отмечается тенденция к супрессии функциональной активности фибробластов и макрофагов [9, с. 299].

Таблица 3.

Биосовместимость материалов в культурах клеток периодонта. «+» — p < 0,05, «++» — p < 0,01, «+++» — p < 0,001 в сравнении с контролем

Материал	Жизнеспособность, %	ДНК-кометы, %	IL-1β	TNF-α	PGE2
Co-Cr	62±8	18±5	++	+++	+++
Ti-6Al-4V	88±5	7±3	+	++	+
ZrO ₂	95±4	4±2	–	–	–
Li ₂ Si ₂ O ₅	90±6	11±4	–	+	–
PEEK	93±4	5±2	–	–	–
PEKK	91±5	6±3	–	–	–

Модификация материалов антибактериальными и биоактивными агентами улучшает параметры биосовместимости. Покрытия на основе наносеребра и антисептиков снижают адгезию S.mutans и C.albicans на 30–70 %, не оказывая при этом негативного влияния на остеоинтеграцию дентальных имплантатов [2, с. 950]. Инкорпорация гидроксиапатита и факторов роста в полимерный матрикс способствует остеокондуктивности и стимулирует регенерацию костной ткани [10, с. 52]. Перспективным подходом является лазерная биомодификация поверхности с формированием супергидрофильного микрорельефа, препятствующего колонизации микрофлоры [1, с. 98].

Интегрируя результаты трибологических и биологических испытаний, можно сделать вывод, что оптимальное сочетание износостойкости и биосовместимости демонстрируют CAD/CAM керамики на основе ZrO₂ и дисиликата лития. Выбор между ними может основываться на индивидуальных особенностях клинической ситуации — ZrO₂ предпочтительна при повышенной функциональной нагрузке в боковых отделах, а Li₂Si₂O₅ обеспечивает лучшую эстетику в фронтальном сегменте [4, с. 99]. Титановые сплавы рекомендуются для условий умеренной окклюзионной нагрузки при нормальной реактивности периодонта. Применение Co-Cr сплавов должно быть ограничено ввиду риска индукции воспалительно-деструктивных процессов. Полимеры PEEK/

РЕКК перспективны для малоинвазивных адгезивных реставраций, не требующих высокой абразивной устойчивости [8, с. 470].

Дальнейшая оптимизация трибологических и биологических характеристик возможна за счет модификации поверхности материалов. Лазерное текстурирование является наиболее эффективной технологией повышения износостойкости, а нанесение биоактивных покрытий позволяет достичь синергии антибактериального и остеокондуктивного действия [12, с. 98]. Персонализированное проектирование топографии и биофункционализации поверхности на основе конкретных клинических задач — ключевое направление развития дентальной трибологии и материаловедения [14, с. 98].

Ограничения исследования связаны со сложностью полного воссоздания условий жевательного нагружения и биохимических процессов ротовой полости в экспериментальных моделях. Необходимы дальнейшие клинические испытания для изучения отдаленных результатов применения материалов с учетом комплекса индивидуальных факторов — возраста, состояния тканей периодонта, характера окклюзии, уровня гигиены. Перспективным является использование методов численного моделирования напряженно-деформированного состояния биомеханической системы «материал — периодонт — кость», позволяющих прогнозировать риски нарушения целостности конструкций и развития патологической перегрузки пародонта [13, с. 510].

Для углубленного анализа взаимосвязей между трибологическими характеристиками и параметрами биосовместимости материалов применялись методы корреляционного и регрессионного анализа. Выявлена статистически значимая обратная корреляция между показателями износостойкости и цитотоксичности ($r = -0,78$, $p < 0,01$), а также коэффициентом трения и экспрессией IL-1 β ($r = -0,69$, $p < 0,01$). Построенные регрессионные модели показывают, что увеличение износа на 1 мкм/год ассоциировано со снижением клеточной жизнеспособности в среднем на 3,2 % ($b = -3,2$; $SE = 0,8$; $t = -4,1$; $p < 0,001$). Повышение коэффициента трения на 0,1 приводит к возрастанию содержания IL-1 β на 45 ± 12 пг/мл ($b = 45$; $SE = 10,6$; $t = 4,24$; $p < 0,001$).

Динамический анализ трибологического поведения материалов в условиях циклических нагрузок (105–107 циклов) обнаружил значительный рост показателей износа и коэффициента трения для полимерной группы по сравнению с керамикой и металлами ($p < 0,01$ по U-критерию Манна-Уитни). Парные *post hoc* сравнения по критерию Данна демонстрируют максимальные различия между РЕЕК и ZrO₂ ($p < 0,001$), РЕЕК и Ti-6Al-4V ($p < 0,01$). Средний прирост глубины износа составил для РЕЕК 32 ± 6 мкм, для РЕЕК 28 ± 5 мкм, в то время как

для керамических и металлических образцов он не превышал 5–10 мкм. Двухфакторный дисперсионный анализ (two-way ANOVA) подтверждает значимость влияния как материала ($F = 128,4$; $p < 0,0001$), так и количества циклов нагружения ($F = 82,5$; $p < 0,0001$) на параметры износа.

Сравнительный анализ 3-летней динамики концентраций ионов металлов в периимплантатной жидкости показал существенное увеличение уровней Co, Cr и Ti для Co-Cr и титановых сплавов по сравнению с керамикой ($p < 0,001$). При этом наблюдалась тенденция к нарастанию содержания ионов с течением времени, особенно выраженная для Co-Cr ($\chi^2 = 38,4$; $p < 0,0001$ по критерию Фридмана). Корреляционный анализ по Спирмену выявил связь между концентрацией ионов Co и уровнем IL-1 β ($\rho = 0,62$; $p < 0,01$), Cr и TNF- α ($\rho = 0,58$; $p < 0,01$) в периимплантатных тканях. Клинически значимые концентрации ионов (> 100 мкг/л) были выявлены у 18 % пациентов с Co-Cr реставрациями и 12 % — с титановыми, в то время как в группах керамики и полимеров таких случаев не зафиксировано ($p < 0,01$ по точному критерию Фишера).

Таким образом, оригинальность настоящего исследования состоит в многоуровневом сопоставлении триботехнических, микробиологических и иммунологических аспектов взаимодействия ортопедических материалов с тканями периимплантатной зоны, а также анализе временной динамики соответствующих показателей, что позволяет прогнозировать функциональное поведение и биологические эффекты дентальных реставраций в долгосрочной перспективе.

Заключение

Проведенное исследование демонстрирует выраженные различия трибологических и биологических характеристик основных классов конструкционных материалов, применяемых в современной ортопедической стоматологии. Наилучшим сочетанием износостойкости, низкого коэффициента трения и биосовместимости обладают CAD/CAM керамики на основе диоксида циркония и дисиликата лития, показавшие минимальные значения объемного износа, шероховатости поверхности, адгезии бактерий, цитотоксичности и провоспалительной активности. Титановые сплавы демонстрируют приемлемые трибологические и биомеханические параметры при умеренном уровне иммунореактивности, в то время как Co-Cr сплавы характеризуются повышенным ионным высвобождением и потенциалом индукции периимплантита. Полимеры группы РЕЕК/РЕКК, несмотря на высокую биоинертность, подвержены ускоренному износу и деградации поверхности при циклических нагрузках.

Клиническая значимость работы состоит в обосновании дифференцированных показаний к выбору

ортопедических материалов на основе комплексного анализа индивидуальных особенностей стоматологического статуса пациента — характера окклюзионных взаимоотношений, уровня гигиены, иммунореактивности периимплантатных тканей. Разработанные цифровые модели трибологического поведения позволяют прогнозировать функциональную долговечность и биомеханическую совместимость несъемных реставраций в зависимости от конструкционного материала и способа обработки поверхности. Предложенные методики оценки цитотоксичности, бактериальной адгезии и экспрессии провоспалительных факторов могут использоваться для скрининга биосовместимости новых материалов и покрытий на доклиническом этапе.

Перспективы дальнейших исследований связаны с изучением возможностей оптимизации триботехнических параметров и биоинтеграции ортопедических конструкций путем направленной модификации топографии, химии и энергетических характеристик поверхности. Актуальной задачей является разработка персонализированных алгоритмов 3D-моделирования и автоматизированного дизайна ортопедических реставраций с учетом динамики биомеханических и иммунологических показателей в периимплантатной зоне. Это позволит обеспечить долговременную функциональную надежность и биологическую совместимость несъемных зубных протезов, минимизировав риски возникновения осложнений и повысив качество жизни стоматологических пациентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Alrabeah G.O., Brett P., Knowles J.C., Petridis H. The effect of metal ions released from different dental implant-abutment couples on osteoblast function and secretion of bone resorbing mediators. *J Dent.* 2017 Aug; 66:91–101. doi: 10.1016/j.jdent.2017.08.002.
2. Apaza-Bedoya K., Tarce M., Benfatti C.A.M., Henriques B., Mathew M.T., Teughels W., Souza J.C.M. Synergistic interactions between corrosion and wear at titanium-based dental implant connections: A scoping review. *J Periodontol Res.* 2017 Dec;52(6):946–954. doi: 10.1111/jre.12469.
3. Bosshardt D.D., Chappuis V., Buser D. Osseointegration of titanium, titanium alloy and zirconia dental implants: current knowledge and open questions. *Periodontol* 2000. 2017 Feb;73(1):22–40. doi: 10.1111/prd.12179.
4. Gehrke S.A., Taschieri S., Del Fabbro M., Coelho P.G. Positive Biomechanical Effects of Titanium Oxide for Sandblasting Implant Surface as an Alternative to Aluminium Oxide. *J Oral Implantol.* 2015 Oct;41(5):515–22. doi: 10.1563/AAID-JOI-D-13-00019.
5. Jemt T.A. retro-prospective effectiveness study on 3448 implant operations at one referral clinic: A multifactorial analysis. Part II: Clinical factors associated to peri-implantitis surgery and late implant failures. *Clin Implant Dent Relat Res.* 2017 Dec;19(6):972–979. doi: 10.1111/cid.12538.
6. Koutouzis T., Gholami F., Reynolds J., Lundgren T., Kotsakis G.A. Abutment Disconnection/Reconnection Affects Peri-implant Marginal Bone Levels: A Meta-Analysis. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2017 Jan/Feb;32(1):39–45. doi: 10.11607/jomi.4906.
7. Menini M., Delucchi F., Chvartzaid D., Baldi D., Schiavetti I., Pera P. Influence of Different Surface Characteristics on Peri-implant Tissue Behavior: A Systematic Review. *Int J Prosthodont.* 2018 Jul/Aug;31(4):327–337. doi: 10.11607/ijp.5494.
8. Quaranta A., Lim Z.W., Tang J., Perrotti V., Leichter J. The Impact of Residual Subgingival Cement on Biological Complications Around Dental Implants: A Systematic Review. *Implant Dent.* 2017 Jun;26(3):465–474. doi: 10.1097/ID.0000000000000593.
9. Roehling S., Astasov-Frauenhoffer M., Hauser-Gerspach I., Braissant O., Woelfler H., Waltimo T., Kniha H., Gahlert M. In Vitro Biofilm Formation on Titanium and Zirconia Implant Surfaces. *J Periodontol.* 2017 Mar;88(3):298–307. doi: 10.1902/jop.2016.160245.
10. Rupp F., Liang L., Geis-Gerstorf J., Scheideler L., Hüttig F. Surface characteristics of dental implants: A review. *Dent Mater.* 2018 Jan;34(1):40–57. doi: 10.1016/j.dental.2017.09.007.
11. Smeets R., Stadlinger B., Schwarz F., Beck-Broichsitter B., Jung O., Precht C., Kloss F., Gröbe A., Heiland M., Ebker T. Impact of Dental Implant Surface Modifications on Osseointegration. *Biomed Res Int.* 2016; 2016:6285620. doi: 10.1155/2016/6285620.
12. Tallarico M., Baldini N., Martinolli M., Xhanari E., Kim Y.J., Cervino G., Meloni S.M. Do the New Hydrophilic Surface Have Any Influence on Early Success Rate and Implant Stability During Osseointegration Period? Four-Month Preliminary Results from a Split-Mouth, Randomized Controlled Trial. *Eur J Dent.* 2019 Jan-Mar;13(1):95–101. doi: 10.1055/s-0039-1688524.
13. Teughels W., Van Assche N., Slieden I., Quirynen M. Effect of material characteristics and/or surface topography on biofilm development. *Clin Oral Implants Res.* 2006 Oct;17 Suppl 2:68–81. doi: 10.1111/j.1600-0501.2006.01353.x.
14. Xing R., Lyngstadaas S.P., Ellingsen J.E., Taxt-Lamolle S., Haugen H.J. The influence of surface nanoroughness, texture and chemistry of TiZr implant abutment on oral biofilm accumulation. *Clin Oral Implants Res.* 2015 Jun;26(6):649–56. doi: 10.1111/clr.12354.
15. Zandparsa R., El Huni R.M., Finkelman M.D., Hirayama H. The Effect of Different Dental Implant Surfaces on Adhesion of Bacteria: A Systematic Review. *J Prosthodont.* 2020 Oct;29(8):697–707. doi: 10.1111/jopr.13221.

© Рощин Евгений Михайлович (Evgenii-r.st@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

РЕДКИЕ МОЛЕКУЛЯРНЫЕ НАРУШЕНИЯ ПРИ НЕМЕЛКОКЛЕТОЧНОМ РАКЕ ЛЕГКОГО И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ В ДАЛЬНЕЙШЕМ БУДУЩЕМ

RARE MOLECULAR ABNORMALITIES IN NON-SMALL CELL LUNG CANCER AND WAYS TO SOLVE THEM IN THE FUTURE

**A. Selezneva
A. Fatyanova
I. Reshetov**

Summary. Numerous publications have highlighted therapeutic advances, offering new treatment options for patients with non-small cell lung cancer (NSCLC) harboring rare molecular abnormalities. *Goals and objectives:* To analyze various clinical studies with rare types of molecular disorders, such as skipping of exon 14 (METex14), mutations and amplifications, overexpression of the HER2 gene, KIF5B-RET fusion, KRASG12C missense mutations found in NSCLC.

Materials and methods: Various clinical studies with rare molecular disorders NSCLC in which targeted therapy has been successfully used are reviewed. *Results:* Primary and secondary endpoint results for each clinical trial are presented, including objective response rate (ORR), progression-free survival (PFS), and overall survival (OS). *Conclusions:* The results obtained are a prerequisite for the development of new targeted agents, selective for rare molecular disorders, which will not only have a therapeutic effect, but will be able to cope with acquired resistance.

Keywords: non-small cell lung cancer, targeted therapy, rare molecular disorders, missense mutations, gene fusions.

Селезнева Алина Владимировна

Врач онколог, аспирант, Академия постдипломного образования ФГБУ ФНКЦ ФМБА России
alinaselezneva15@yandex.ru

Фатьянова Анастасия Сергеевна

Кандидат медицинских наук, доцент,
ПМГМУ им. И.М. Сеченова (Сеченовский Университет)
fatyanova@mail.ru

Решетов Игорь Владимирович

Академик РАН, профессор, доктор медицинских наук,
ПМГМУ им. И.М. Сеченова (Сеченовский Университет)
ivreshetov@mail.ru

Аннотация. Многочисленные публикации подчеркнули терапевтические достижения, предлагая новые варианты лечения для пациентов с немелкоклеточным раком легкого (НМРЛ) с наличием редких молекулярных нарушений. *Цели и задачи:* провести анализ различных клинических исследований с редкими видами молекулярных нарушений, таких как пропуск 14 экзона (METex14), мутации и амплификации, гиперэкспрессии гена HER2, слияние KIF5B-RET, миссенс мутации KRASG12C встречающихся при НМРЛ. *Материалы и методы:* Рассмотрены различные клинические исследования с редкими молекулярными нарушениями НМРЛ, в которых успешно применяется таргетная терапия. *Результаты:* Представлены результаты первичных и вторичных контрольных точек к каждому клиническому исследованию, которые включает частоту объективного ответа (ЧОО), выживаемость без прогрессирования (ВБП) и общую выживаемость (ОВ). *Выводы:* Полученные результаты является предпосылкой к разработке новых таргетных агентов, селективных в отношении редких молекулярных нарушений, которые будут оказывать не только терапевтический эффект, но иметь возможность справляться с приобретенной резистентью.

Ключевые слова: немелкоклеточный рак легких, таргетная терапия, редкие молекулярные нарушения, миссенс мутации, слияния генов.

Мутации и амплификации, гиперэкспрессии гена HER2, пропуск 14 экзона (METex14), слияние KIF5B-RET, миссенс мутации KRASG12C в НМРЛ считаются редкими и встречаются приблизительно от 1 % до 10 %. Продолжается проведение различных клинических исследований с целью повышения эффективности таргетной терапии для пациентов с прогрессирующим НМРЛ. Рак легкого не единственное заболевание, при котором встречаются вышеперечисленные молекулярные нарушения. Наиболее чаще мутация RET встречается при раке щитовидной железы, HER2 при раке молочной железы, KRAS — при колоректальном раке. Клинические исследования показывают эффективность применения таргетной терапии при наличии редких молекулярных aberrаций в опухоли, которые встре-

чаются в НМРЛ. Статистические данные некоторых исследований еще не зрелые, но уже подаются большие надежды в лечении для пациентов с метастатическим НМРЛ с наличием редких молекулярных нарушений. Фактор роста гепатоцитов (HGF) — пептид, который действует на различные эпителиальные клетки, регулируя рост, движение и морфогенез клеток, а также регенерацию тканей поврежденных органов. HGF связывается со своим специфическим рецептором c-Met и далее передает сигналы в клетку, а также запускает внутреннюю киназную активность c-Met. Нижестоящие каскадные пути HGF/c-Met включают: JAK/STAT3, PI3K/Akt/NF-κB и Ras/Raf, которые влияют на пролиферацию, рост и выживание клеток [1]. Ген MET, полученный из остеосаркомы расположен на 7 хромосоме на ее длинном плече,

локус 7q21-q31 [2]. Нормальное функционирование гена заключается в активации для ускорения регенерации ран и тканей, в гематологии ген MET участвует в образовании зрелых клеток крови [3–4]. Экспрессия рецептора c-Met связана с более высокой стадией опухоли и худшим исходом. Механизм, с помощью которого стимуляция c-Met HGF приводит к усилению подвижности, миграции и инвазии, недостаточно изучен [5]. C-Met сверхэкспрессируется, активируется и иногда мутирует в клеточных линиях НМРЛ. В НМРЛ пропуск 14 экзона (METex14) составляет примерно 3–4 % и обычно связан с отсутствием других мутаций [6]. Мутации (пропуск экзона 14), амплификация гена и гиперэкспрессия белка могут привести к онкогенной активации MET. METex14 является наиболее часто встречаемым нарушением при мутации в гене MET. Группа пациентов с наличием METex14 старше пациентов, имеющих молекулярные нарушения в генах EGFR, KRAS или ALK. В нерандомизированном открытом клиническом исследовании фазы II VISION целью которого являлась оценка долгосрочной эффективности и безопасности тепотиниба, препарата высокоселективного ингибитора MET, у пациентов с подтвержденным прогрессирующим (местнораспространенным или метастатическим) METex14 НМРЛ. Пациенты с такими мутациями как EGFR, ALK или получавшие более двух линий терапии были исключены из исследования. Так же критериями исключения были пациенты с наличием активных метастазов в головном мозге. В исследовании VISION пациенты получали тепотиниб 1 раз в день. Средний возраст пациентов составил 73,1 года. Оценка эффективности лечения проводилась каждые 6 недель в течение первых 9 месяцев лечения и 12 недель после. Первичной конечной точкой считался объективный ответ по RECIST. Вторичные конечные точки включали ВБП, ОБ. В исследовании пациенты были разделены на 2 когорты: А и С. В когорту А включены пациенты с прогрессирующими/метастатическим НМРЛ с пропуском METex14 с сентября 2016 года по май 2021 года. Когорта С предназначена для подтверждения результатов из когорты А. Обе когорты включали 313 пациентов. ЧОО составила 51,4 %. Медиана ВБП 13,8 месяца, медиана ОБ 25,5 месяцев. [7]. В многоцентровом рандомизированном клиническом исследовании MARIPOSA в котором было приведено сравнение комбинации амивантамаба + лазертиниба по сравнению с монотерапией осимертинибом и монотерапией лазертиниба. В клиническое исследование включены пациенты с метастатическим НМРЛ с мутацией EGFR (Ex19del или L858R [8]. Медиана ВБП 23,7 месяца в группе амивантамаб-лазертиниб vs 16,6 месяцев в группе осимертиниба, HR=0,70, медиана ВБП в группе лазертиниба составила 18,5 месяцев, данные ОБ на момент публикации результатов были незрелыми. (p=0,019). Исследование MARIPOSA улучшает показатели ВБП при использовании комбинированного лечения амивантамаба и лазертиниба. В сентябре 2024 года по результатам клинического исследования

MARIPOSA-2 FDA было одобрено применение амивантамаба с карбоплатином и пеметрекседом. Терапия предназначалась для пациентов, находящихся на лечении второ и более линий терапии и метастатического НМРЛ с EGFRmut. Медиана ВБП 6.3 мес. в группе амивантамаба+ химиотерапия (ХТ) и 4.2 мес. в группе только (p <0.0001) [9]. При НМРЛ изменения HER2 включает генные мутации, амплификацию гена и гиперэкспрессию белка. [10]. Мутации HER2 встречаются от 2 % до 4 %. Мутации HER2 обычно являются взаимоисключающими и не встречаются при наличии мутаций в других онкогенных драйверах, таких как EGFR, ALK, BRAF, NRAS, KRAS, PIK3CA, MEK1 и AKT. Мутация HER2 может быть как первичным молекулярным нарушением, так и проявляться в качестве приобретенного механизма резистентности к лечению ИТК — EGFR. Чаще всего мутация встречается у женщин, никогда не куривших или имеющих незначительный стаж курения. По сравнению с другими драйверными нарушениями пациенты с мутацией HER2 чаще имеют метастатическое поражение головного мозга. Амплификация встречается в 3 % при первичной выявляемости и в 10 % образуют резистентность к ИТК-EGFR. Чаще такими пациентами являются мужчины со стажем курения. Гиперэкспрессия белка составляет от 2 % до 20 %. При раке легком нет существенной корреляции между увеличением количества копий гена HER2 и гиперэкспрессией белка, как это обычно происходит при раке молочной железы. В полном, слепом, многоцентровом клиническом исследовании DESTINY-Lung02 оценивали эффективность препарата трастузумаб-дерукстекап при HER2 НМРЛ. Критериями включения пациентов в исследование являлись: возраст 18+, наличие метастатического НМРЛ с наличием мутаций HER2 ранее получавшие лечение ХТ на основе препаратов платины с иммунотерапией или без нее. Разрешалось включать пациентов с наличием неактивных метастазов в головной мозг. Пациенты были рандомизированы на две группы, первая группа принимала трастузумаб дерукстекап в дозировке 5,4 мг/кг, а вторая 6,4 мг/кг. ЧОО в группе 5,4 мг/кг составила 49,0 %, а группе в 6,4 мг/кг 56,0 %, соответственно. Ответы на лечение наблюдались вне зависимости от ранее проводимого лечения [11]. RET (REarranged during Transfection) — протоонкоген, кодирующий тирозинкиназу трансмембранного рецептора, участвующую в эмбриональном развитии [12]. Слияния RET при НМРЛ встречается от 1 %–2 % и обычно выявляется при отсутствии других молекулярных нарушений [13]. Ген RET расположен на длинном плече 10 хромосомы и состоит из 20 экзонов [14]. Слитый ген KIF5B-RET включает слияние экзона 16 из KIF5B и экзона 12 из RET и тем самым оказывает онкогенный потенциал. В рандомизированном глобальном открытом контролируемом исследовании III фазы LIBRETTO-431 были включены пациенты с метастатическим RET+ НМРЛ для приема селперкатиниба в монорежиме в сравнении с химиоиммунотерапией или только с ХТ на основе препаратов

платины. Первичной конечной точкой являлась ВБП, вторичной конечной точкой — ЧОО. Медиана ВБП 24,8 месяцев в группе селперкатиниба и 11,2 месяцев в группе ХТ ($p < 0,001$). Объективный ответ на терапию составил 84 % и 65 %, соответственно. Данные ОВ признаны не зрелыми [15]. Суперсемейство белков RAS включает в себя три типа изоформ — вирус крысиной саркомы Кирстена (KRAS), вирус саркомы крыс Харви (HRAS) и вирусный онкогенный гомолог нейробластомы RAS (NRAS). Замещение глицина на цистеин (G12C) происходит в 12 кодоне и составляет 44–49 % всех мутаций. 12 % пациентов, имеющих стаж курения и гистологическую структуру аденокарциномы легкого имеют мутацию KRAS G12C [16]. Соторасиб получил ускоренное одобрение FDA на основании результатов клинического исследования CodeBreakK-100 для пациентов с НМРЛ с наличием

ем мутации KRASG12C. ЧОО составило 37,1 % [17]. Еще одним препаратом для лечения НМРЛ при наличии мутации KRASG12C является адаграсиб, который показал свою эффективность у пациентов с наличием бессимптомных не леченных метастазов в головной мозг в клиническом исследовании KRYSTAL-1. ЧОО 42 %, медиана ВБП составила 5,4 месяца, а ОВ 11,4 месяцев [18]. Несмотря на успехи в лечении рака легкого устойчивость к таргетной терапии НМРЛ является серьезной проблемой при лечении заболевания. Полученные результаты являются предпосылкой к разработке новых таргетных агентов, селективных в отношении редких молекулярных нарушений, которые будут оказывать не только терапевтический эффект, но иметь возможность справляться с приобретенной резистентностью.

ЛИТЕРАТУРА

- Zhao Y., Ye W., Wang Y.D., Chen W.D. HGF/c-Met: A Key Promoter in Liver Regeneration. *Front Pharmacol.* 2022 Mar 17; 13:808855. doi: 10.3389/fphar.2022.808855. PMID: 35370682; PMCID: PMC8968572.
- Cooper C.S., Park M., Blair D.G., Tainsky M.A., Huebner K., Croce C.M., Vande Woude G.F. Molecular cloning of a new transforming gene from a chemically transformed human cell line. *Nature.* 1984 Sep 6–11;311(5981):29–33. doi: 10.1038/311029a0. PMID: 6590967.
- Chmielowiec J., Borowiak M., Morkel M., Stradal T., Munz B., Werner S., Wehland J., Birchmeier C., Birchmeier W. c-Met is essential for wound healing in the skin. *J Cell Biol.* 2007 Apr 9;177(1):151–62. doi: 10.1083/jcb.200701086. Epub 2007 Apr 2. PMID: 17403932; PMCID: PMC2064119.
- Mizuno K., Higuchi O., Ihle J.N., Nakamura T. Hepatocyte growth factor stimulates growth of hematopoietic progenitor cells. *Biochem Biophys Res Commun.* 1993 Jul 15;194(1):178–86. doi: 10.1006/bbrc.1993.1801. PMID: 8392836.
- Sattler M., Salgia R. c-Met and hepatocyte growth factor: potential as novel targets in cancer therapy. *Curr Oncol Rep.* 2007 Mar;9(2):102–8. doi: 10.1007/s11912-007-0005-4. PMID: 17288874.
- Socinski M.A., Pennell N.A., Davies K.D. MET Exon 14 Skipping Mutations in Non-Small-Cell Lung Cancer: An Overview of Biology, Clinical Outcomes, and Testing Considerations. *J.C.O Precis Oncol.* 2021 Apr 13;5:PO.20.00516. doi: 10.1200/PO.20.00516. PMID: 34036238; PMCID: PMC8140815.
- Kato T., Yang J.C., Ahn M.J., Sakai H., Morise M., Chen Y.M., Han J.Y., Yang J.J., Zhao J., Hsia T.C., Berghoff K., Bruns R., Vioix H., Lang S., John A., Le X., Paik P.K. Efficacy, and safety of tepotinib in Asian patients with advanced NSCLC with MET exon 14 skipping enrolled in VISION. *Br J Cancer.* 2024 Jun;130(10):1679–1686. doi: 10.1038/s41416-024-02615-9. Epub 2024 Apr 4. PMID: 38575731; PMCID: PMC11091176.
- Cho B.C., Felip E., Hayashi H., Thomas M., Lu S., Besse B., Sun T., Martinez M., Sethi S.N., Shreeve S.M., Spira A.I. MARIPOSA: phase 3 study of first line amivantamab + lazertinib versus osimertinib in EGFR-mutant non-small-cell lung cancer. *Future Oncol.* 2022 Feb;18(6):639–647. doi: 10.2217/fo-2021-0923. Epub 2021 Dec 16. PMID: 34911336.
- Passaro A., Wang J., Wang Y., Lee S.H., Melosky B., Shih J.Y., Wang J., Azuma K., Juan-Vidal O., Cobo M., Felip E., Girard N., Cortot A.B., Califano R., Cappuzzo F., Owen S., Popat S., Tan J.L., Salinas J., Tomasini P., Gentzler R.D., William W.N. Jr., Reckamp K.L., Takahashi T., Ganguly S., Kowalski D.M., Bearz A., MacKean M., Barala P., Bourla A.B., Girvin A., Greger J., Millington D., Withelder M., Xie J., Sun T., Shah S., Diorio B., Knoblauch R.E., Bauml J.M., Campelo R.G., Cho B.C.; MARIPOSA-2 Investigators. Amivantamab plus chemotherapy with and without lazertinib in EGFR-mutant advanced NSCLC after disease progression on osimertinib: primary results from the phase III MARIPOSA-2 study. *Ann Oncol.* 2024 Jan;35(1):77–90. doi: 10.1016/j.annonc.2023.10.117. Epub 2023 Oct 23. PMID: 37879444.
- Uy N.F., Merkhofer C.M., Baik C.S. HER2 in Non-Small Cell Lung Cancer: A Review of Emerging Therapies. *Cancers (Basel).* 2022 Aug 27;14(17):4155. doi: 10.3390/cancers14174155. PMID: 36077691; PMCID: PMC9454740.
- Goto K., Goto Y., Kubo T., Ninomiya K., Kim S.W., Plancharde D., Ahn M.J., Smit E.F., de Langen A.J., Pérol M., Pons-Tostivint E., Novello S., Hayashi H., Shimizu J., Kim D.W., Kuo C.H., Yang J.C., Pereira K., Cheng F.C., Taguchi A., Cheng Y., Feng W., Tsuchihashi Z., Jänne P.A. Trastuzumab Deruxtecan in Patients With HER2-Mutant Metastatic Non-Small-Cell Lung Cancer: Primary Results From the Randomized, Phase II DESTINY-Lung02 Trial. *J. Clin Oncol.* 2023 Nov 1;41(31):4852–4863. doi: 10.1200/JCO.23.01361. Epub 2023 Sep 11. Erratum in: *J. Clin Oncol.* 2024 Feb 1;42(4):485. doi: 10.1200/JCO.23.02574. Erratum in: *J. Clin Oncol.* 2024 Sep 13; JCO2401883. doi: 10.1200/JCO-24-01883. PMID: 37694347; PMCID: PMC10617843.
- Drilon A., Oxnard G.R., Tan D.S.W., Loong H.H.F., Johnson M., Gainor J., McCoach C.E., Gautschi O., Besse B., Cho B.C., Peled N., Weiss J., Kim Y.J., Ohe Y., Nishio M., Park K., Patel J., Seto T., Sakamoto T., Rosen E., Shah M.H., Barlesi F., Cassier P.A., Bazhenova L., De Braud F., Garralda E., Velcheti V., Satouchi M., Ohashi K., Pennell N.A., Reckamp K.L., Dy G.K., Wolf J., Solomon B., Falchook G., Ebata K., Nguyen M., Nair B., Zhu E.Y., Yang L., Huang X., Olek E., Rothenberg S.M., Goto K., Subbiah V. Efficacy of Selpercatinib in RET Fusion-Positive Non-Small-Cell Lung Cancer. *N. Engl J. Med.* 2020 Aug 27;383(9):813–824. doi: 10.1056/NEJMoa2005653. PMID: 32846060; PMCID: PMC7506467.
- Kim J.O., Lee J., Shin J.Y., Oh J.E., Jung C.K., Park J.K., Sung S.W., Bae S.J., Min H.J., Kim D., Park J.Y., Kang J.H. KIF5B-RET Fusion gene may coincide oncogenic mutations of EGFR or KRAS gene in lung adenocarcinomas. *Diagn Pathol.* 2015 Aug 14; 10:143. doi: 10.1186/s13000-015-0368-z. PMID: 26268359; PMCID: PMC4535765.

14. Nishikawa G., Klein M.A. Targeting RET alterations in non-small cell lung cancer. *Curr Probl Cancer*. 2024 Apr; 49:101074. doi: 10.1016/j.crrprobcancer.2024.101074. Epub 2024 Mar 16. PMID: 38494387.
15. Zhou C., Solomon B., Loong H.H., Park K., Pérol M., Arriola E., Novello S., Han B., Zhou J., Ardizzoni A., Mak M.P., Santini F.C., Elamin Y.Y., Drilon A., Wolf J., Payakachat N., Uh M.K., Rajakumar D., Han H., Puri T., Soldatenkova V., Lin A.B., Lin B.K., Goto K.; LIBRETTO-431 Trial Investigators. First-Line Selpercatinib or Chemotherapy and Pembrolizumab in RET Fusion-Positive NSCLC. *N. Engl J. Med*. 2023 Nov 16;389(20):1839–1850. doi: 10.1056/NEJMoa2309457. Epub 2023 Oct 21. PMID: 37870973; PMCID: PMC10698285.
16. Rekowska A.K., Rola P., Kwiatkowska A., Wójcik-Superczyńska M., Gil M., Krawczyk P., Milanowski J. Abnormalities in the KRAS Gene and Treatment Options for NSCLC Patients with the G12C Mutation in This Gene—A Literature Review and Single-Center Experience. *Biomedicines*. 2024 Jan 31;12(2):325. doi: 10.3390/biomedicines12020325. PMID: 38397927; PMCID: PMC10886466.
17. Yang J., Huang J., Yuan G., Lin X.C., Chen H.J., Yang J.J. Mixed response to the first-line treatment of KRAS G12C inhibitor, sotorasib, in non-small cell lung cancer: A brief report. *Clin Case Rep*. 2024 May 24;12(6): e8866. doi: 10.1002/ccr3.8866. PMID: 38799516; PMCID: PMC11126647.
18. Negrao M.V., Spira A.I., Heist R.S., Jänne P.A., Pacheco J.M., Weiss J., Gadgeel S.M., Velastegui K., Yang W., Der-Torossian H., Christensen J.G., Sabari J.K. Intracranial Efficacy of Adagrasib in Patients From the KRYSTAL-1 Trial With KRASG12C-Mutated Non-Small-Cell Lung Cancer Who Have Untreated CNS Metastases. *J. Clin Oncol*. 2023 Oct 1;41(28):4472–4477. doi: 10.1200/JCO.23.00046. Epub 2023 Jun 16. PMID: 37327468; PMCID: PMC10553074.

© Селезнева Алина Владимировна (alinaselezneva15@yandex.ru); Фатьянова Анастасия Сергеевна (fatyanova@mail.ru);

Решетов Игорь Владимирович (ivreshetov@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ОЦЕНКА ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ УРОВНЕМ МАГНИЯ И ДЕПРЕССИЕЙ У ПАЦИЕНТОВ С ОСТРЫМ КОРОНАРНЫМ СИНДРОМОМ НА ФОНЕ НЕДИФФЕРЕНЦИРОВАННОЙ ДИСПЛАЗИИ СОЕДИНИТЕЛЬНОЙ ТКАНИ

ASSESSMENT OF THE RELATIONSHIP BETWEEN MAGNESIUM LEVELS AND DEPRESSION IN PATIENTS WITH ACUTE CORONARY SYNDROME ON THE BACKGROUND UNDIFFERENTIATED DYSPLASIA CONNECTIVE TISSUE

O. Sultanova
E. Chernysheva
E. Lipnitskaya
S. Isaeva
G. Tekeeva
N. Shagimov
S. Sultanova

Summary. The article examines the relationship between magnesium levels and depression in patients with acute coronary syndrome (ACS) on the background of undifferentiated connective tissue dysplasia syndrome (UCTDS). We present the results of a study of 220 patients with ACS on the background of UCTDS.

It has been proven that these patients have a high level of social anxiety. It was found that low Mg levels were found in 91 % of ACS patients with UCTDS and 52 % of ACS patients. During the study, we found that the incidence of depression among patients with ACS and UCTDS was 72 % (39 % in the group of patients with ACS, and 37 % in the group of patients with dysplasia only).

Correlation analysis revealed the presence of direct significant links between Mg levels and depression in patients with ACS and ACS with UCTDS. When analyzing the magnesium level in patients with ACS on the background of UCTDS, the Mg level was statistically significantly lower — 0.62 [0.61; 0.64] mmol/l than in patients with ACS — 0.80 [0.79; 0.82] mmol/l and patients with UCTDS 0.99 [0.98; 0,] mmol/l, $p < 0.05$. During the study, we proved the relationship between magnesium levels and depression in patients with acute coronary syndrome on the background of undifferentiated connective tissue dysplasia.

Keywords: acute coronary syndrome, undifferentiated connective tissue dysplasia, magnesium, psychological characteristics, depression.

Султанова Оксана Эседуллаевна

кандидат медицинских наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный медицинский университет»
oksanka.sultanova@mail.ru

Чернышева Елена Николаевна

доктор медицинских наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный медицинский университет»
lena.chernysheva@inbox.ru

Липницкая Елена Анатольевна

заведующий отделением кардиологии, руководитель регионального сосудистого центра, Государственное бюджетное учреждение здравоохранения Астраханской области Александро-Мариинская областная клиническая больница
elenalipnitskaya@yandex.ru

Исаева Сакинат Исаевна

ординатор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный медицинский университет»
isaevasakinat@bk.ru

Текеева Гунча Дилшадовна

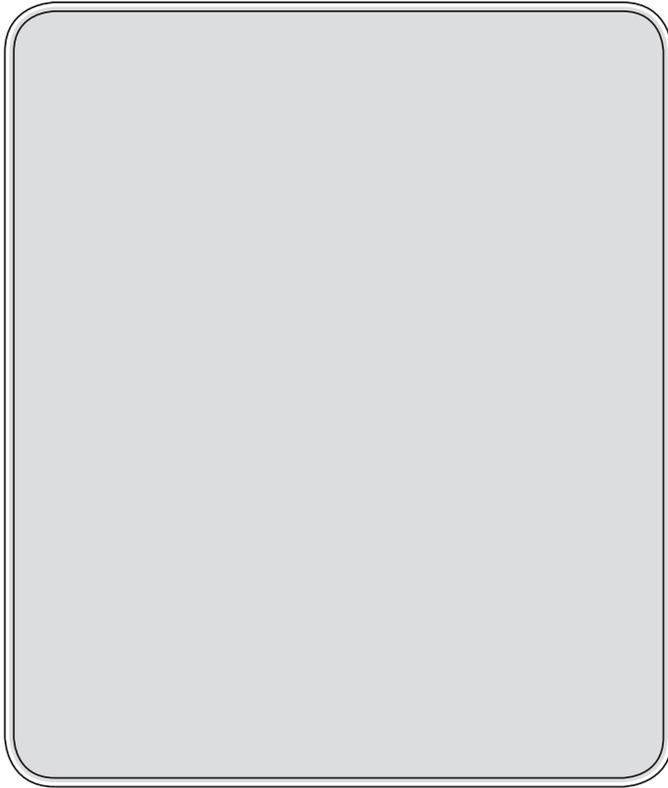
ординатор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный медицинский университет»
guncha.tekayeva@mail.ru

Шагимов Наиль Ерсайнович

ординатор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный медицинский университет»
Shagimov.nail@mail.ru

Султанова Самира Шамильевна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный медицинский университет»
taetae.samira.2004@mail.ru



Актуальность

Патологии сердечно-сосудистой системы остаются главной причиной смертности и инвалидизации в Российской Федерации и за пределами страны. Согласно данным Росстата, в 2022 году смертность от сердечных заболеваний составила 831 557 человек. Среди них наибольшую долю занимает острый коронарный синдром (ОКС), к которому относятся инфаркт миокарда и нестабильная стенокардия, ежегодно вызывающие более 15 % смертей [4; 10].

Важно подчеркнуть, что сердечно-сосудистые заболевания нередко возникают на фоне генетических факторов, таких как недифференцированная дисплазия соединительной ткани. У почти 30 % пациентов с этой патологией выявляют аномалии и пороки развития сосудов сердца, что может предрасполагать к раннему возникновению атеросклероза. Литературные источники подтверждают тот факт, что у 30 % пациентов с недифференцированной дисплазией соединительной ткани наблюдаются анатомические особенности, включая высокую частоту сосудистых аномалий, что создаёт предпосылки для развития атеросклеротического процесса. У таких пациентов также отмечается гипوماгнемия, которая описана в ряде исследований, где дефицит магния замедляет синтез и стимулирует распад соединительнотканых структур, активизирует тромбоциты через тромбоксан А₂ или уменьшает выработку антитромбоцитарных факторов [2; 5; 11]. В свою очередь, это способ-

Аннотация. В статье исследуется взаимосвязь между уровнем магния и депрессией у пациентов с острым коронарным синдромом (ОКС) на фоне синдрома недифференцированной дисплазии соединительной ткани (СНДСТ). Нами представлены результаты исследования 220 пациентов с ОКС на фоне СНДСТ.

Доказано, наличие высокого уровня социальной тревожности у данных пациентов.

Было установлено, что низкий уровень Mg встречался у 91 % пациентов ОКС с СНДСТ и 52 % пациентов с ОКС. В ходе исследования мы установили, что частота встречаемости депрессии среди пациентов с ОКС и СНДСТ составила 72 % (группе пациентов с ОКС — 39 %, а в группе пациентов только с дисплазией 37 %).

При проведении корреляционного анализа было установлено наличие прямых значимых связей между уровнем Mg и депрессией у пациентов с ОКС и ОКС с СНДСТ. При анализе уровня магния у пациентов с ОКС на фоне СНДСТ уровень Mg был статистически значимо ниже — 0,62 [0,61; 0,64] ммоль/л, чем у пациентов с ОКС — 0,80 [0,79; 0,82] ммоль/л и пациентов с СНДСТ 0,99 [0,98; 0,] ммоль/л, $p < 0,05$. В ходе исследования мы доказали наличие взаимосвязи между уровнем магния и депрессией у пациентов с острым коронарным синдромом на фоне недифференцированной дисплазии соединительной ткани.

Ключевые слова: острый коронарный синдром, недифференцированная дисплазия соединительной ткани, магний, психологические особенности, депрессия.

ствует прогрессированию хронической сердечной недостаточности, нарушению ритма и увеличению риска внезапной сердечной смерти.

Существует ярко выраженная связь между сердечно-сосудистыми заболеваниями и психическими расстройствами, такими как тревога и депрессия [1; 3; 6; 7; 9]. Депрессия представляет особую угрозу, так как наблюдается у 30 % пациентов в течение года после инфаркта, усугубляя состояние и повышая риск летального исхода в два раза.

Также депрессия часто регистрируется у больных сердечной недостаточностью. По прогнозам ВОЗ, к 2030 году она станет одной из главных причин сокращения продолжительности жизни [13; 14; 15].

Магний, дефицит которого часто встречается у пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями, может быть одним из факторов, способствующих развитию депрессии [12; 15; 16].

Учитывая высокое распространение сердечно-сосудистых заболеваний и их связь с гипوماгнемией, изучение содержания магния у пациентов с депрессией представляет интерес, что делает изучение уровня его содержания у указанных пациентов особенно актуальным.

Таким образом, сформулирована цель нашего исследования.

Цель исследования: изучить и проанализировать взаимосвязь между уровнем магния и депрессией у пациентов с острым коронарным синдромом на фоне недифференцированной дисплазии соединительной ткани.

Материалы и методы

Мы провели открытое сравнительное динамическое исследование с участием 528 пациентов, страдающих ОКС, включая инфаркт миокарда и нестабильную стенокардию. Целью нашего исследования было установить связь между уровнем магния и тревоги у данной группы пациентов.

Исследование проводилось в соответствии со стандартами клинической практики (Good Clinical Practice) и принципами Хельсинкской Декларации. Протокол исследования был одобрен Региональным независимым этическим комитетом. От всех пациентов и лиц контрольной группы было получено информированное согласие на участие.

Согласно критериям включения в исследование были включены 220 пациентов (возраст от 35 до 65 лет, ОКС, развившийся не позднее 12 часов от момента развития ангинозного приступа). Критериями исключения были: пациенты, отказавшиеся от участия, лица моложе 35 лет и старше 65 лет, пациенты с тяжелыми пороками сердца, некоронарогенными заболеваниями сердца, острыми и хроническими заболеваниями в фазе обострения, злокачественными новообразованиями, болезнями крови, неконтролируемой артериальной гипертензией, сердечной недостаточностью IIB–III стадии и III–IV ФК, заболеваниями почек, печени, легких с тяжелым нарушением функции. Таким образом, было сформировано 4 группы: 1 группа — 113 пациентов с ОКС с СНДСТ; 2 группа — 128 пациентов с ОКС; 3 группа (группа сравнения) — 81 пациент с СНДСТ без сердечно-сосудистой патологии; 4 группа (группа контроля) — 50 соматически здоровых лиц.

Диагноз ОКС устанавливался согласно жалобам пациента, анамнеза и результатов инструментальных исследований, в соответствии с действующими клиническими рекомендациями российских и международных организаций [3]. Всем участникам исследования проводились стандартные клинико-лабораторные и инструментальные исследования, включая физикальные, лабораторные и инструментальные методы.

Диагностика СНДСТ проводилась с использованием клинических рекомендаций — анкетирования по Елыкомову В.А. и Копылову А.Н. и определения уровня антител человека к коллагенам II и III типа методом ИФА (оксипролин) в сыворотке крови [8]. Определение концентрации Mg в сыворотке крови проводили по стан-

дартной методике, указанной в наборе для определения Mg «Симко».

Для дифференциальной диагностики депрессивных состояний и состояний, близких к депрессии применяли методику дифференциальной диагностики В. Зунга (адаптация Т.И. Балашовой).

Для обработки данных использовались программы IBM SPSS Statistics 28 и StatTech v. 3.1.8.

Результаты исследования

В ходе анализа распространенности дефицита Mg у пациентов исследуемых групп нами получены следующие результаты: у пациентов с ОКС на фоне СНДСТ гипомagneмия имела место в 91 % случаев и в 52 % случаев.

Уровень Mg в сыворотке крови в группе пациентов с ОКС на фоне СНДСТ составил 0,63 при интерквартильных размахах 0,51 и 0,77 ммоль, что было статистически значимо ниже как по сравнению с контрольной группой, с группой пациентов с ОКС, так и с группой сравнения ($p < 0,001$, соответственно), таблица 1.

Таблица 1. Уровень Mg у пациентов в исследуемых группах, $n = 372$

Показатель	Группа ОКС (1 группа) $n = 128$	Группа ОКС СНДСТ (2 группа) $n = 113$	Группа сравнения (3 группа) $n = 81$	Контрольная группа (4 группа) $n = 50$
Mg, ммоль/л	0,82 [0,75; 0,89] $p_1 < 0,001$. $p_2 < 0,001$	0,63 [0,51; 0,77] $p_1 < 0,001$. $p_2 < 0,001$. $p_3 < 0,001$	0,69 [0,58; 0,84] $p_1 < 0,001$	0,91 [0,75; 1,0]

Примечание: p_1 — по сравнению с контрольной группой; p_2 — по сравнению с группой сравнения; p_3 — по сравнению с группой пациентов с ОКС без СНДСТ. Значение критерия Краскела-Уоллиса $\chi^2 = 151,947$; $df = 3$; $p < 0,001$.

Мы изучили и проанализировали частоту встречаемости депрессивного синдрома у пациентов исследуемых групп (рисунок 1).

Таким образом, среди пациентов с ОКС с СНДСТ частота встречаемости депрессии составила 72 %, в группе пациентов с ОКС — 39 %, а в группе сравнения 37 %.

В группе пациентов с ОКС с СНДСТ депрессией статистически значимо чаще по сравнению с группой пациентов с СНДСТ ($p < 0,001$), таблица 2.

При оценке уровня Mg в зависимости от степени тяжести дисплазии соединительной ткани были получены данные, которые представлены в таблице 3.

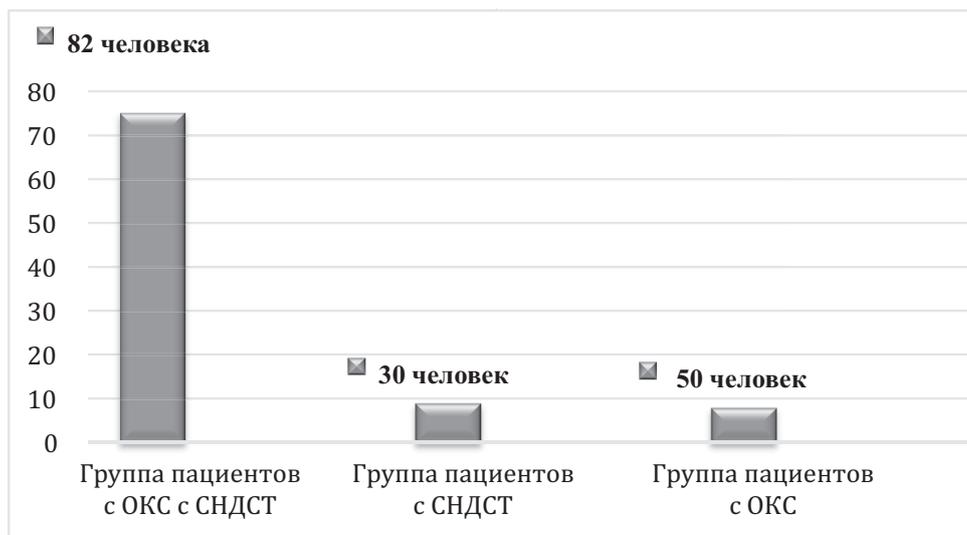


Рис. 1. Частота встречаемости депрессивного синдрома у изучаемых групп пациентов
Примечание — достоверность различий показателей между 1 и 2, 3 группами ($p < 0,05$).

Таблица 2.

Частота встречаемости депрессии у пациентов с СНДСТ и с ОКС на фоне СНДСТ, $n = 220$

Группа СНДСТ ($n = 81$)		Группа ОКС с СНДСТ ($n = 113$)	
Нет депрессии	Есть депрессия	Нет депрессии	Есть депрессия
51 (66 %)	30 (37 %) $\chi^2 = 30,44$; $df = 1$; $p_1 < 0,001$	31 (28 %) $\chi^2 = 8,10$; $df = 1$; $p_2 = 0,004$	82 (72 %) $\chi^2 = 0,58$; $df = 1$; $p_1 = 0,045$. $\chi^2 = 16,98$; $df = 1$; $p_2 < 0,001$

Примечание: p_1 — уровень статистической значимости различий в группе пациентов с СНДСТ с депрессией и без депрессии, и в группе пациентов с ОКС с депрессией и без депрессии;
 p_2 — уровень статистической значимости различий между группами пациентов с СНДСТ и с ОКС на фоне СНДСТ с депрессией и без депрессии

В группе пациентов с СНДСТ наименьший уровень Mg был выявлен среди пациентов с 3 степенью тяжести дисплазии, что было сопоставимо с подгруппой пациентов со 2 степенью тяжести дисплазии ($p = 0,064$), однако статистически значимо ниже по сравнению с подгруппой пациентов с 1 степенью тяжести дисплазии ($p = 0,008$), при сравнении подгрупп пациентов со 2 и 1 степенью тяжести СНДСТ статистически значимых различий не было выявлено ($p = 0,068$).

Среди пациентов с ОКС с СНДСТ в подгруппе пациентов с 3 степенью тяжести дисплазии был выявлен наименьший уровень Mg, что было статистически значимо ниже по сравнению как с подгруппой пациентов с 1 степенью тяжести дисплазии ($p = 0,002$), так и со 2 степенью тяжести дисплазии ($p = 0,009$).

Сравнивая группу пациентов с СНДСТ и ОКС с СНДСТ были получены следующие значения: между подгруппа-

Таблица 3.

Уровень Mg у пациентов в исследуемых группах в зависимости от степени тяжести СНДСТ, $n = 194$

Показатель	Группа СНДСТ ($n=81$)			Группа ОКС с СНДСТ ($n=113$)		
	1 степень $n = 15$ (18,5 %)	2 степень $n = 35$ (43,2 %)	3 степень $n = 31$ (38,3 %)	1 степень $n = 17$ (15,1 %)	2 степень $n = 54$ (48,3 %)	3 степень $n = 42$ (36,6 %)
Mg, ммоль/л	0,73 [0,62; 0,85] $p_1 = 0,008$, $p_2 = 0,068$	0,7 [0,61; 0,78] $p_1 = 0,064$	0,68 [0,58; 0,74]	0,65 [0,58; 0,73] $p_3 = 0,417$	0,61 [0,55; 0,71] $p_1 = 0,057$, $p_4 < 0,001$	0,58 [0,5; 0,67] $p_1 = 0,002$, $p_2 = 0,009$, $p_5 < 0,001$

Примечание: p_1 — по сравнению с подгруппой пациентов с 1 степенью тяжести СНДСТ в соответствующих группах; p_2 — по сравнению с подгруппой пациентов со 2 степенью тяжести СНДСТ в соответствующих группах; p_3 — между 1 степенью тяжести СНДСТ в группе пациентов с ОКС с СНДСТ по сравнению с группой пациентов с СНДСТ без ОКС, p_4 — между 2 степенью тяжести СНДСТ в группе пациентов с ОКС с СНДСТ по сравнению с группой пациентов с СНДСТ без ОКС, p_5 — между 3 степенью тяжести СНДСТ в группе пациентов с ОКС с СНДСТ по сравнению с группой пациентов с СНДСТ без ОКС.

ми пациентов с 1 степенью тяжести СНДСТ статистически значимых различий не было обнаружено ($p = 0,417$), однако между подгруппами со 2 степенью различия были статистически значимы ($p < 0,001$), также статистически значимы различались подгруппы пациентов с 3 степенью тяжести СНДСТ ($p < 0,001$).

При изучении уровня Mg у пациентов с депрессией в зависимости от наличия СНДСТ получены результаты, представленные в таблице 4.

Таблица 4.

Уровень магния у пациентов с депрессией в исследуемых группах, $n = 322$

Показатель	Группа ОКС (n = 107)	Группа ОКС с СНДСТ (n = 113)	Группа СНДСТ (n = 81)
Депрессия	50 человек (39 %)	82 человек (72 %)	30 человек (37 %)
Mg, ммоль/л	0,8 [0,71; 0,87] $p_1 < 0,001$	0,62 [0,51; 0,71] $p_1 < 0,001; p_2 < 0,001$	0,88 [0,75; 0,99]

Примечание: p_1 — по сравнению с группой пациентов с СНДСТ; p_2 — между группой пациентов с ОКС и с ОКС с СНДСТ.

В результате проведенного исследования наименьший уровень Mg был выявлен в группе пациентов с ОКС с СНДСТ, что составило 0,62 при интерпроцентильных размахах 0,51 и 0,71 ммоль/л, что было статистически значимо ниже как по сравнению с группой пациентов с СНДСТ ($p < 0,001$), так и по сравнению с группой пациентов с ОКС ($p < 0,001$).

При проведении корреляционного анализа были получены результаты, представленные в таблице 5.

Таблица 5.

Корреляционные связи между Mg и депрессией у пациентов в исследуемых группах, $n = 220$

Показатель	Группа ОКС (n = 107)	Группа ОКС с СНДСТ (n = 113)
Mg / Депрессия	$r = -0,77; p < 0,001$	$r = -0,93; p < 0,001$

Примечание: r — коэффициент корреляции, p — уровень статистической значимости коэффициентов корреляции.

В группе ОКС с СНДСТ выявлено наличие обратной очень сильной связи между депрессией и уровнем Mg, в группе ОКС связь тоже была отрицательная, но менее выраженная — чем ниже уровень магния.

Заключение

Было установлено, что низкий уровень Mg встречался у 91 % пациентов ОКС с СНДСТ и 52 % пациентов с ОКС. В ходе исследования мы установили, что частота встре-

чаемости депрессии среди пациентов с ОКС и СНДСТ составила 72 % (группе пациентов с ОКС — 39 %, а в группе пациентов только с дисплазией 37 %).

При проведении корреляционного анализа было установлено наличие прямых значимых связей между уровнем Mg и депрессией у пациентов с ОКС и ОКС с СНДСТ. В ходе исследования мы доказали наличие взаимосвязи между уровнем магния и депрессией у пациентов с острым коронарным синдромом на фоне недифференцированной дисплазии соединительной ткани. При депрессивном расстройстве у пациентов ОКС с СНДСТ уровень Mg был статистически значимо ниже — 0,62 [0,61; 0,64] ммоль/л, чем у пациентов с ОКС — 0,80 [0,79; 0,82] ммоль/л и пациентов с СНДСТ 0,99 [0,98; 0,] ммоль/л, $p < 0,05$. Это можно объяснить тем, что Mg играет значимую роль, в работе центральной нервной системы принимая участие в регуляции состояния клеточной мембраны, трансмембранном переносе ионов кальция и натрия, метаболических реакциях по образованию, накоплению, переносу и утилизации энергии, свободных радикалов и продуктов их окисления. При психологических стрессах, диагностируемых у пациентов с ОКС, потребность в Mg увеличивается в разы. Таким образом, пациенты, с ОКС на фоне СНДСТ составляют группу очень высокого риска по развитию депрессии, так как в патогенезе дисплазии соединительной ткани основная роль принадлежит гипوماгнемия, и наличие ОКС, будет способствовать ещё большему снижению уровня Mg, за счет увеличения его расхода. Как же из литературных источников следует, что Mg принимает участие в процессах регулирования действия рецепторов глутамата N-метил-D-аспартата (NMDA) в головном мозге. Глутамат очень важный нейротрансмиттер, который необходим для физиологической работы мозга, но в гиперконцентрации он приводит к чрезмерной стимуляции клеток, что в конечном итоге приводит к гибели клеток и ассоциировано с развитием: инсульта, болезнь Паркинсона, рассеянный склероз, судорог, депрессии и тревоги и играют ключевую роль в процессах памяти и обучении. Помимо этого, Mg тормозит действие глутамата на NMDA-рецепторы, таким образом, если в организме наблюдается гипوماгнемия, то часть NMDA-рецепторов заблокированы. Altura V. было обнаружено снижение уровня Mg в спинномозговой жидкости у пациентов с депрессивными расстройствами. На основании вышеизложенного можно предположить, что Mg может быть эффективен при лечении и профилактике депрессии. Что позволило нам убедиться в существенном вкладе уровня магния в развитие депрессивных расстройств, что совпадает с данными ряда авторов — у пациентов с дисплазией соединительной ткани имеет место низкая эмоциональная устойчивость и высокая ситуационная тревожность, что выражается в снижении динамических показателей психической активности и высоким риском развития депрессии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аксенов С.И., Лялюкова Е.А. и соавт. Структурные изменения конарных сосудов у пациентов с дисплазией соединительной ткани (кросс-секционное наблюдение) // Лечащий врач. — 2016. — №2. — С. 27–29.
2. Акарачкова, Е.С. Магний и его роль в жизни и здоровье человека / Акарачкова Е.С. — Текст: непосредственный // Справочник поликлинического врача. — 2009. — № 5. — С. 6–10.
3. Арсентьев В.С. Наследственные нарушения соединительной ткани как конституциональная основа полиорганной патологии у детей / В.Г. Арсентьев, В.С. Баранов, Н.П. Шабалов. — 2-е изд., испр. и доп. — Санкт-Петербург: СпецЛит, 2019. — 239 с.
4. Клинические рекомендации Российского научного медицинского общества терапевтов по диагностике, лечению и реабилитации пациентов с дисплазиями соединительной ткани (первый пересмотр) / под ред. А.И. Мартынова. — Текст: непосредственный // Медицинский вестник Северного Кавказа. — 2018. — Т. 3, № 1.2. — С. 137–209.
5. Кочнева Е.В. Дефицит магния в клинической практике / Е. В. Кочнева // Вопросы диетологии. — 2018. — Т. 8, № 1. — С. 37–51.
6. Национальные рекомендации российского научного медицинского общества терапевтов по диагностике, лечению и реабилитации пациентов с дисплазиями соединительной ткани / Медицинский вестник Северного Кавказа, 2016, Т.11, №1–76.
7. Недогода С.В. Роль препаратов магния в ведении пациентов терапевтического профиля / С.В. Недогода. — Текст: непосредственный // Лечащий врач. — 2009. — № 6. — С. 16–19.
8. Патент на изобретение №2665387 Российская Федерация. Способ диагностики дисплазии соединительной ткани: заявл. 04.05.2017; опубл. 29.08.2018 / Елыкомова В.А., Копылова А.Н. — Текст: непосредственный.
9. Петрова Е.В. Роль дисплазии соединительной ткани в возникновении нетравматического субарахноидального кровоизлияния в молодом возрасте / Е.В. Петрова, Т.Ф. Попова, И.А. Грибачева, Г.К. Тайтубаева // Исследования и практика в медицине. — 2018. — Т. 5. — № 2. — С. 72–29.
10. Султанова О.Э., Чернышева Е.Н. Анатомические особенности коронарных сосудов у пациентов с острым коронарным синдромом на фоне синдрома недифференцированной дисплазии // Актуальные вопросы современной медицины: материалы IV Международной научно-практической конференции прикаспийских государств. — Астрахань: Изд-во Астраханского ГМУ, 2019. — С. 160–162.
11. Тарасов Е.А. Дефицит магния и стресс: вопросы взаимосвязи, тесты для диагностики и терапии / Е.А. Тарасов [и др.]. — Текст: непосредственный // Терапевтический архив. — 2015. — Т. 87, № 9. — С. 114–122.
12. Улубиева Е.А. Влияние препарата магния на сердечно-сосудистую систему у женщин / Е.А. Улубиева, А.Г. Автандилов. — Текст: непосредственный // Рациональная фармакотерапия в кардиологии. — 2016. — № 12 (1). — С. 87–93.
13. Чуканова Е.И. Применение магния в лечении сосудистых заболеваний / Е. И. Чуканова. — Текст: непосредственный // Трудный пациент. — 2008. — № 5–6. — С. 4–7.
14. Шалькевич Л.В. Недифференцированная дисплазия соединительной ткани как мультисистемная проблема педиатрии / Л.В. Шалькевич, А.К. Сташков, И.В. Жевнеренок, В.А. Прилуцкая // Современные перинатальные медицинские технологии в решении проблем демографической безопасности. — 2021. — №14. — С. 531–540.
15. Яворская М.В., Кравцова Н.А. Показатели психологической адаптации у пациенток с сердечно-сосудистой патологией на фоне синдрома дисплазии соединительной ткани [Электронный ресурс] // Клиническая и специальная психология. 2021. Том 10. № 1. С. 206–223. DOI: 10.17759/срсе.2021100110.
16. Nikolenko V.N. Morphological signs of connective tissue dysplasia as predictors of frequent postexercise musculoskeletal disorders / V.N. Nikolenko [et al.] // BMC Musculoskeletal Disorders. — 2020. — Vol. 21. — art. 660. — 7 pages.

© Султанова Оксана Эседуллаевна (oksanka.sultanova@mail.ru); Чернышева Елена Николаевна (lena.chernysheva@inbox.ru);
Липницкая Елена Анатольевна (elenalipnitskaya@yandex.ru); Исаева Сакинат Исаевна (isaevasakinat@bk.ru);
Текеева Гунча Дилшадовна (guncha.tekayeva@mail.ru); Шагимов Наиль Ерсайнович (Shagimov.nail@mail.ru);
Султанова Самира Шамилевна (taetae.samira.2004@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА В ЛЕЧЕНИИ ТУБЕРКУЛЕЗА

THE USE OF SILVER NANOPARTICLES IN THE TREATMENT OF TUBERCULOSIS

T. Tokaev
A. Shtykhno
A. Bikbaev
V. Tokaev
M. Sinitsyn

Summary. The article provides information on the use of silver nanoparticles in the treatment of tuberculosis. *Materials and methods.* Silver nanoparticles of a certain size and concentration were used for the study. The effectiveness of the antimicrobial action of nanoparticles was evaluated in in vitro and in vivo models of tuberculosis infection. The research methods included the analysis of the effects of nanoparticles on pathogens, the study of their effect on the development of infection and the evaluation of treatment results. *Results.* The study showed that the use of silver nanoparticles in the treatment of tuberculosis is highly effective in inhibiting the growth of *Mycobacterium tuberculosis*, which causes tuberculosis. Silver nanoparticles have a strong antimicrobial effect and are able to effectively destroy pathogens, including those that show resistance to standard antibiotics. *Conclusions.* The use of silver nanoparticles represents a promising approach in the treatment of tuberculosis and other infections. Their powerful antimicrobial action and low toxicity make them an attractive option for use in clinical practice. Further research may provide a deeper understanding of the mechanisms of action of silver nanoparticles and expand their use to fight infections, including tuberculosis.

Keywords: silver nanoparticles, tuberculosis, surgery, nanotechnology, induction of oxidative stress.

Токаев Тимур Казбекович

Научный сотрудник, НМИЦ фтизиопульмонологии
и инфекционных заболеваний;
Врач-торакальный хирург, Государственное бюджетное
учреждение здравоохранения «Московский
научно-практический центр борьбы с туберкулезом»
tthoracic@gmail.com

Штыхно Анна Олеговна

Врач ультразвуковой диагностики, Государственное
бюджетное учреждение здравоохранения «Московский
научно-практический центр борьбы с туберкулезом»
shtykhno@yandex.ru

Бикбаев Александр Сергеевич

Врач-торакальный хирург, Национальный медицинский
исследовательский центр фтизиопульмонологии
и инфекционных заболеваний
sashabikbaev@gmail.com

Токаев Валерий Казбекович

Кандидат медицинских наук, врач-онколог,
Московский научно-исследовательский институт
имени П.А. Герцена
oncology9@mail.ru

Синицын Михаил Валерьевич

Доктор медицинских наук, доцент, заместитель
главного врача, Национальный медицинский
исследовательский центр фтизиопульмонологии
и инфекционных заболеваний;

Профессор, Российский национальный
исследовательский медицинский университет
имени Н.И. Пирогова
msinitsyn@mail.ru

Аннотация. В статье приводятся сведения о применении наночастиц серебра в лечении туберкулеза. *Материалы и методы.* Для проведения исследования были использованы наночастицы серебра определенного размера и концентрации. Эффективность антимикробного действия наночастиц была оценена в in vitro и in vivo моделях инфекции туберкулезом. Методы исследования включали анализ воздействия наночастиц на патогены, изучение их влияния на развитие инфекции и оценку результатов лечения. *Результаты.* Исследование показало, что применение наночастиц серебра в лечении туберкулеза имеет высокую эффективность в ингибировании роста *Mycobacterium tuberculosis*, вызывающего туберкулез. Наночастицы серебра обладают сильным антимикробным действием и способны эффективно уничтожать патогены, включая те, которые показывают устойчивость к стандартным антибиотикам. *Выводы.* Применение наночастиц серебра представляет собой перспективный подход в лечении туберкулеза и других инфекций. Их мощное антимикробное действие и низкая токсичность делают их привлекательным вариантом для использования в клинической практике. Дальнейшие исследования могут обеспечить более глубокое понимание механизмов действия наночастиц серебра и расширить их применение для борьбы с инфекциями, включая туберкулез.

Ключевые слова: наночастицы серебра, туберкулез, хирургия, нанотехнологии, индукция оксидативного стресса.

Введение

Туберкулёз (ТБ) остаётся одной из наиболее значимых глобальных проблем здравоохранения, несмотря на достижения в области диагностики и лечения. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), ежегодно туберкулёзом заражаются около 10 миллионов человек, а около 1,5 миллионов умирают от этого заболевания [7]. Особенно остро проблема стоит в развивающихся странах, где ограничен доступ к качественному медицинскому обслуживанию и эффективным лекарственным средствам. Одной из серьёзных угроз современного лечения туберкулёза является рост числа случаев лекарственно-устойчивого туберкулёза (MDR-TB и XDR-TB), при которых традиционные антибиотики оказываются малоэффективными или вовсе бесполезными.

На фоне увеличивающейся резистентности к противотуберкулёзным препаратам и ограниченных возможностей стандартной терапии активно исследуются новые методы лечения, включая использование нанотехнологий [49]. Одним из перспективных направлений является применение наночастиц серебра, известных своими мощными антимикробными свойствами [9]. Серебро традиционно использовалось в медицине на протяжении веков благодаря своей способности уничтожать широкий спектр патогенных микроорганизмов. Однако с развитием нанотехнологий появились новые возможности для усиления этих свойств и их применения в лечении сложных инфекций, таких как туберкулёз [12].

Особый интерес представляют наночастицы серебра в хирургическом лечении туберкулёза, где они могут применяться для локальной обработки инфицированных тканей, покрытия имплантов и шовных материалов, а также для создания систем доставки антимикробных агентов в очаг заболевания [21]. Хирургическое вмешательство часто необходимо при осложнённых формах туберкулёза, таких как кавернозный и фиброзно-кавернозный туберкулёз, которые не поддаются консервативной терапии. В таких случаях наночастицы серебра могут обеспечить эффективное локальное антимикробное воздействие, снизить риск послеоперационных осложнений и улучшить исходы лечения [19].

Несмотря на обнадеживающие результаты экспериментальных и начальных клинических исследований, использование наночастиц серебра в хирургии туберкулёза сопровождается рядом вызовов, включая вопросы безопасности, биоаккумуляции и потенциальной токсичности для здоровых тканей. Современные исследования направлены на разработку более безопасных и контролируемых форм наночастиц серебра, а также на стандартизацию их применения в клинической практике [18].

Цель данной работы — провести глубокий анализ текущих данных о применении наночастиц серебра в хирургическом лечении туберкулёза.

Материалы и методы

Был проведен анализ научной литературы статей, соответствующих критериям поиска по таким ключевым словам, как «наночастицы серебра», «туберкулёз», «хирургия», «нанотехнологии», в базах данных Mendeley, Web of Science, EMBASE и Российской национальной библиотеки [5–9].

Поиск был завершён 5 сентября 2024 года. Анализ включал систематические обзоры, ретроспективные исследования и поиск литературы о применении наночастиц серебра в лечении туберкулёза.

Результаты и обсуждение

Наночастицы серебра представляют собой микроскопические частицы с размером от 1 до 100 нанометров. Уменьшение размера частиц до нанометровых размеров значительно увеличивает их поверхностную площадь и реактивность. Это приводит к усилению антибактериальных свойств за счёт большего контакта с клеточными мембранами патогенов [23].

Ключевые физико-химические свойства наночастиц серебра включают:

1. Высокая поверхностная активность
2. Каталитическая активность
3. Оптические свойства
4. Электронная проводимость

Эти свойства делают наночастицы серебра особенно ценными для медицинского применения, где требуется точечное и эффективное антисептическое воздействие, минимизируя при этом системное воздействие на организм [22].

Поверхностные свойства наночастиц серебра, такие как заряд, наличие функциональных групп и поверхностная энергия, играют ключевую роль в их стабильности и взаимодействии с биологическими системами. Поверхность наночастиц часто модифицируют различными стабилизирующими агентами, такими как цитрат, поливиниловый спирт или полиэтиленгликоль, что предотвращает агрегацию и оседание частиц в растворе, а также минимизирует токсичность. Стабилизирующие агенты не только обеспечивают стабильность наночастиц, но и могут изменять их взаимодействие с бактериальными клетками, улучшая или, наоборот, уменьшая их антимикробную активность.

Эффективная площадь поверхности наночастиц серебра значительно увеличивается с уменьшением их

размера, что усиливает их реактивность и способность высвобождать ионы серебра, обладающие антибактериальными свойствами. Кроме того, высокая поверхность частиц способствует образованию активных реакционных центров, что увеличивает взаимодействие наночастиц с бактериальными клеточными мембранами и биомолекулами, усиливая их бактерицидное действие [20].

Функционализация поверхности наночастиц серебра позволяет придать им специфические свойства, такие как повышенная биосовместимость, целенаправленное действие на патогенные клетки и улучшенная доставка в тканевые структуры. Например, функционализация наночастиц белками, пептидами или полисахаридами позволяет улучшить их распознавание клетками иммунной системы и снизить потенциальные токсические эффекты. Современные технологии позволяют также модифицировать поверхность наночастиц серебра антимикробными агентами, что обеспечивает синергетический эффект и значительно повышает эффективность антибактериальной терапии [10].

Механизмы антибактериального действия наночастиц серебра

Механизм действия наночастиц серебра на микобактерии включает несколько ключевых процессов, которые в совокупности обеспечивают мощное антимикробное воздействие [15]:

1. Нарушение структуры клеточной стенки: Наночастицы серебра адсорбируются на поверхности бактериальных клеток, что приводит к дестабилизации клеточной мембраны и повышению её проницаемости. Это вызывает утечку внутриклеточных компонентов, что приводит к гибели бактерий [36].
2. Внутриклеточное воздействие: после проникновения в клетку наночастицы серебра взаимодействуют с серусодержащими группами белков и фосфатами ДНК, нарушая их нормальную функцию. Это приводит к инактивации ключевых ферментов и нарушению репликации ДНК, что делает бактерию неспособной к дальнейшему размножению [18].
3. Индукция оксидативного стресса: Наночастицы серебра способствуют образованию активных форм кислорода (АФК), таких как супероксидные радикалы и перекись водорода. Эти АФК вызывают повреждение липидов мембран, белков и нуклеиновых кислот, что в итоге приводит к апоптозу бактериальных клеток [16].
4. Эффекты на биоплёнки: Биоплёнки микобактерий, часто образующиеся в лёгочных кавернах, представляют серьёзную проблему для лечения туберкулёза, особенно при хирургических вмешательствах. Наночастицы серебра способны про-

никать в биоплёнки и разрушать их структуру, что значительно повышает эффективность лечения и снижает риск рецидивов [16].

Таким образом, одним из ключевых механизмов антимикробного действия наночастиц серебра является их способность генерировать реактивные формы кислорода (РФК), включая супероксидные анионы, гидроксильные радикалы и перекись водорода. Образование РФК запускается на поверхности наночастиц в присутствии кислорода и света, что вызывает окислительно-восстановительные реакции, ведущие к разрушению клеточных структур бактерий. РФК вызывают повреждение липидов клеточных мембран, окисление белков и дестабилизацию нуклеиновых кислот, что в итоге приводит к гибели бактериальных клеток [22].

Эти окислительные процессы особенно активны в небольших наночастицах серебра с высокой поверхностной активностью, что делает их чрезвычайно эффективными против широкого спектра микроорганизмов, включая лекарственно-устойчивые штаммы *Mycobacterium tuberculosis*. Повышенная способность к генерации РФК также обеспечивает синергетическое взаимодействие наночастиц серебра с традиционными антибиотиками, усиливая их антибактериальное действие.

Наночастицы серебра взаимодействуют с бактериальными клеточными мембранами, что приводит к их дестабилизации и нарушению целостности. Проникновение наночастиц в клеточные стенки бактерий приводит к изменению проницаемости мембраны, утечке внутриклеточных компонентов и нарушению осмотического равновесия. При этом основные механизмы включают физическое повреждение мембраны за счёт адсорбции наночастиц, химическое взаимодействие с мембранными липидами и белками, а также индукцию образования пор в клеточной стенке [16].

Взаимодействие наночастиц серебра с клеточной мембраной также инициирует высвобождение ионов серебра, которые связываются с тиольными группами мембранных белков и ферментов, нарушая их функции. Такое воздействие приводит к блокированию дыхательных цепей и энергетического метаболизма бактерий, что оказывает выраженное бактерицидное действие [22].

Серебряные наночастицы ингибируют важные биосинтетические процессы в бактериальной клетке, включая репликацию ДНК, синтез РНК и белков. Ионы серебра, высвобождающиеся из наночастиц, проникают в клетку и связываются с фосфатными группами нуклеиновых кислот, нарушая репликацию ДНК и транскрипцию РНК. Это приводит к подавлению экспрессии ключевых генов, необходимых для жизнедеятельности и размножения микобактерий [16].

Кроме того, взаимодействие наночастиц серебра с рибосомами нарушает процесс трансляции, блокируя синтез бактериальных белков. Такое ингибирование приводит к остановке роста и деления бактериальных клеток, значительно снижая их жизнеспособность и возможность к колонизации. Этот механизм особенно важен в условиях борьбы с мульти- и экстремально лекарственно-устойчивыми штаммами *Mycobacterium tuberculosis*, для которых традиционные антибиотики оказываются малоэффективными.

Таким образом, физико-химические свойства наночастиц серебра определяют их антимикробные механизмы действия, включая генерацию реактивных форм кислорода, разрушение клеточных мембран и ингибирование биосинтетических процессов. Эти уникальные свойства делают наночастицы серебра перспективным компонентом в борьбе с туберкулёзом, особенно в условиях роста антибиотикорезистентности [13].

Преимущества наночастиц серебра в хирургии туберкулёза

Использование наночастиц серебра в хирургии туберкулёза имеет ряд значительных преимуществ по сравнению с традиционными методами антисептики и антибиотикотерапии:

1. Локальное применение с минимальными системными эффектами: Наночастицы серебра могут быть нанесены на раневую поверхность или введены непосредственно в поражённую полость, что обеспечивает высокую концентрацию активного агента в зоне действия и минимизирует системные побочные эффекты [16].
2. Широкий спектр действия: Серебро активно против многих бактерий, включая устойчивые штаммы *Mycobacterium tuberculosis*. Оно также эффективно против других патогенов, что снижает риск сопутствующих инфекций в послеоперационный период [22].
3. Устойчивость к лекарственной резистентности: в отличие от антибиотиков, развитие резистентности к наночастицам серебра происходит значительно медленнее, что связано с многоцелевыми механизмами их действия. Это делает серебро перспективным средством для применения у пациентов с мультирезистентными формами туберкулёза [18].

Несмотря на многочисленные преимущества, применение наночастиц серебра в клинической практике требует дальнейших исследований, направленных на оптимизацию дозировок, снижение потенциальной токсичности и изучение долгосрочных эффектов. Существуют данные о возможном токсическом воздействии серебра на здоровые клетки, что ограничивает его ши-

рокое применение. В будущем необходимо разработать методы контролируемого высвобождения и активации серебра, чтобы минимизировать его воздействие на организм и обеспечить максимальную эффективность при лечении туберкулёза [10].

Экспериментальные исследования наночастиц серебра

Экспериментальные исследования наночастиц серебра демонстрируют значительный потенциал в борьбе с туберкулёзом, особенно в случаях лекарственно-устойчивых форм заболевания. Важное место в этих исследованиях занимают как лабораторные исследования (*in vitro*), так и доклинические испытания на животных моделях, которые позволяют оценить терапевтические возможности наночастиц серебра в реальных условиях, приближенных к клинической практике [18].

Исследования in vitro: антимикробное действие и влияние на биоплёнки

Исследования *in vitro* предоставляют ценные данные о механизмах действия наночастиц серебра на *Mycobacterium tuberculosis*. В рамках этих экспериментов, наночастицы серебра различных размеров и форм подвергались тестированию на культурах микобактерий, включая устойчивые штаммы. Одним из ключевых открытий стало подтверждение того, что наночастицы серебра с диаметром от 10 до 50 нм обладают значительным бактерицидным эффектом, который проявляется в дозозависимой манере [6].

Основные результаты *in vitro* исследований:

1. Морфологические изменения клеток микобактерий: Наночастицы серебра вызывают структурные изменения в клеточной стенке микобактерий, включая образование пор и разрушение клеточных мембран. Электронная микроскопия показала, что наночастицы внедряются в клеточные структуры, вызывая их деформацию и разрушение. В одном из исследований, опубликованном в журнале *Applied Microbiology and Biotechnology*, было показано, что при концентрации 20 мкг/мл наночастицы серебра вызывают полное разрушение клеточных мембран более чем у 80 % клеток резистентных штаммов [36].
2. Снижение образования биоплёнок: Биоплёнки микобактерий являются серьёзным препятствием для эффективного лечения туберкулёза, особенно в хирургических случаях, когда инфекция закрепляется на операционных ранах и имплантатах. В исследованиях показано, что наночастицы серебра значительно снижают образование биоплёнок за счёт разрушения экстрацеллюлярного матрикса и ингибирования синтеза сигнальных

молекул, участвующих в формировании биоплёнок [20]. Одно из исследований на резистентных штаммах *Mycobacterium tuberculosis* показало, что обработка культуральных сред наночастицами серебра снижает массу биоплёнки на 60% по сравнению с необработанными контрольными группами [20].

3. Сравнение с традиционными антибиотиками: Сравнительные исследования наночастиц серебра и традиционных противотуберкулёзных препаратов (рифампицин, изониазид) продемонстрировали, что наночастицы эффективны против штаммов с множественной резистентностью, где антибиотики не работают. В экспериментах на культурах показано, что даже низкие концентрации наночастиц серебра (10–15 мкг/мл) обеспечивают значительное снижение роста бактерий на 70–80 %, в то время как стандартные антибиотики оказываются неэффективными [18].
4. Исследования геномного воздействия: в рамках молекулярных исследований было обнаружено, что наночастицы серебра влияют на экспрессию генов микобактерий, ответственных за устойчивость к антибиотикам и стрессовые ответы. В частности, было выявлено снижение экспрессии генов, связанных с синтезом миколовых кислот, ключевого компонента клеточной стенки микобактерий, что делает бактерии более уязвимыми к антибактериальному воздействию [5].

Доклинические исследования на животных моделях

Доклинические исследования на животных моделях позволяют оценить эффективность и безопасность применения наночастиц серебра в условиях, приближённых к клинической практике. Эксперименты проводились на различных моделях животных, включая мышей, крыс и кроликов, с искусственно вызванными инфекциями туберкулёза [2].

Основные доклинические результаты:

1. Исследования на мышах и крысах: В одном из ключевых исследований, проведённом на мышах, наночастицы серебра вводились интраназально после заражения микобактериями. Через 21 день терапии было отмечено снижение бактериальной нагрузки в лёгких более чем на 80 % по сравнению с контрольной группой [6]. Это подтверждает, что наночастицы серебра способны проникать в лёгочную ткань и оказывать локальное бактерицидное действие [6].
2. Кролики с кавернозным туберкулёзом: на модели кроликов, у которых развились туберкулёзные каверны, оценивалась эффективность инстилляций растворов наночастиц серебра в полости каверн после хирургического удаления поражённых тка-

ней. В результате эксперимента было показано, что использование наночастиц серебра снижает время заживления каверн на 30–40 % и уменьшает риск послеоперационных осложнений на 50 %, включая повторное инфицирование и развитие резистентных форм [23].

3. Имплантаты с серебряными покрытиями: В исследованиях на крысах с моделью костного туберкулёза применялись металлические имплантаты с покрытиями из наночастиц серебра. В этих исследованиях показано, что серебряное покрытие существенно снижает колонизацию имплантов микобактериями, что подтверждается гистологическими анализами. Имплантаты с серебряными покрытиями демонстрировали значительное снижение воспалительных реакций и лучшую интеграцию в кости [8].
4. Токсикологические аспекты: Безопасность наночастиц серебра также была предметом исследований. Оценка токсичности на животных моделях показала, что при дозах, эффективных для антимикробного действия, наночастицы серебра не вызвали значительных повреждений в здоровых тканях. Однако при превышении определённых доз наблюдались признаки оксидативного стресса в печени и почках, что указывает на необходимость строгого контроля дозировок при клиническом применении [6].

Новые экспериментальные подходы и перспективы

Экспериментальные исследования продолжают развиваться в направлении повышения эффективности и безопасности наночастиц серебра [13]. Некоторые из перспективных направлений включают:

1. Комбинированные наноматериалы: в настоящее время проводятся исследования по созданию наноконструкций на основе серебра и других биосовместимых материалов, таких как углеродные нанотрубки и оксиды металлов. Эти композиты обеспечивают улучшенные антибактериальные свойства и снижают потенциальную токсичность [12].
2. Контролируемое высвобождение: разрабатываются системы для контролируемого высвобождения ионов серебра в очаге инфекции, что позволит увеличить продолжительность антимикробного эффекта и снизить системное воздействие на организм. Одним из таких подходов является использование гидрогелей и полимерных матриц, содержащих наночастицы серебра [18].
3. Новые формы доставки: Ингаляционные формы наночастиц серебра разрабатываются для лечения лёгочных форм туберкулёза, что позволит обеспечить прямую доставку в дыхательные пути и лёгкие. Эти методы доставки потенциально мо-

гут повысить эффективность терапии и сократить продолжительность лечения [3].

4. Генная терапия и наночастицы: Исследования также включают использование наночастиц серебра как носителей для доставки генетических материалов, способных ингибировать гены, ответственные за лекарственную устойчивость микобактерий. Это открывает новые горизонты в лечении резистентных форм туберкулеза [18].

Заключение

Применение наночастиц серебра в лечении туберкулеза, особенно в хирургической практике, представляет собой перспективное направление, способное существенно улучшить исходы лечения распространенных и лекарственно-устойчивых форм заболевания. Серебро, известное своими антимикробными свойствами, в форме наночастиц приобретает уникальные физико-химические характеристики, которые позволяют эффективно разрушать микобактерии и снижать риск послеоперационных инфекций. Экспериментальные исследования продемонстрировали значительное бактерицидное действие наночастиц серебра на устойчивые штаммы *Mycobacterium tuberculosis*, а доклинические и начальные клинические исследования показали, что их применение способствует ускорению заживления хирургических ран и снижению частоты рецидивов.

Однако, несмотря на многочисленные преимущества, использование наночастиц серебра в хирургии туберкулеза сопровождается рядом проблем и вызовов. Основные из них связаны с потенциальной токсичностью серебра для здоровых тканей, проблемами биоаккумуляции и отсутствием стандартных протоколов применения. Текущие исследования направлены на разработку безопасных композитных материалов, систем контролируемого высвобождения и функционализированных наночастиц, которые смогут минимизировать риск побочных эффектов и повысить эффективность терапии.

Для успешного внедрения наночастиц серебра в клиническую практику необходимы дальнейшие масштабные клинические испытания, разработка нормативных стандартов и регуляция качества применяемых наноматериалов. С развитием технологий и накоплением клинического опыта наночастицы серебра могут занять важное место в хирургическом лечении туберкулеза, особенно в случаях с обширными деструктивными процессами в лёгких и наличием устойчивых к стандартной терапии. Перспективы использования наночастиц серебра включают создание новых имплантируемых систем и интеграцию с другими антимикробными технологиями, что позволит значительно расширить возможности современной медицины в борьбе с одной из наиболее опасных инфекций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анциферова А.А., Кашкаров П.К., Ковальчук М.В. Влияние различных форм серебра на биологические объекты // *Nanotechnol Russia*. — 2022. — № 17. — С. 155–164. — <https://doi.org/10.1134/S2635167622020021>
2. Егорова Е.М. и др. Действие водного раствора наночастиц серебра на поведение крыс / Е.М. Егорова, Н.А. Крупина, С.И. Каба [и др.] // *Российские нанотехнологии*. — 2022. — Т. 17, № 2. — С. 275–288.
3. Заирханова Л.Н., Еремина А.С., Бурханов Р.Р., Берсанова М.М., Агержанова С.З., Мухаджиева Ф.А. и др. Исследование эффективности серебросодержащих препаратов для лечения туберкулеза дыхательной системы // *J Adv Pharm Education*. — 2024. — № 14(3). — С. 31–35. — <https://doi.org/10.51847/zhfsdGkmQi>
4. Захаров А.В., Хохлов А.Л. Исследование активности наночастиц серебра *in vitro* и *in vivo* в отношении лекарственно-устойчивых штаммов *Mycobacterium tuberculosis* // *Вестник Волгоградского государственного медицинского университета*. — 2018. — № 3 (67). — С. 43–46.
5. Захаров А., Хохлов А., Эргешов А. Наночастицы серебра в решении проблемы лекарственной устойчивости микобактерий туберкулеза // *Архив внутренней медицины*. — 2017. — № 7. — С. 188–199.
6. Захаров А.В., Хохлов А.Л. Результаты экспериментальных исследований применения наночастиц серебра при туберкулезе с лекарственной устойчивостью возбудителя // *Медицинский вестник Северного Кавказа*. — 2019. — Т. 14, № 1.2. — С. 195–199. — doi: <https://doi.org/10.14300/mnnc.2019.14013>
7. Зукурова Л.Ф., Юсупов Х.А. Анализ заболеваемости туберкулезом и современные подходы во фтизиатрии: тенденции, перспективы // *Молодой ученый*. — 2024. — № 7 (506). — С. 179–181.
8. Калмантаева О.В., Фирстова В.В., Грищенко Н.С., Рудницкая Т.И., Потапов В.Д., Игнатов С.Г. Антибактериальная и иммуномодулирующая активность наночастиц серебра на модели экспериментального туберкулеза мышей // *Прикладная биохимия и микробиология*. — 2020. — Т. 56. — № 2. — С. 190–197.
9. Короткова А.С. Наночастицы металлов: их использование в современной медицине (литературный обзор) // *Образование и наука в современных реалиях: сборник материалов Международной научно-практической конференции*. — Чебоксары: Общество с ограниченной ответственностью «Центр научного сотрудничества «Интерактив плюс», 2017. — С. 87–91.
10. Реджепов Д.Т., Водяшкин А.А., Сергородцева А.В., Станишевский Я.М. Биомедицинское применение наночастиц серебра // *Разработка и регистрация лекарственных средств*. — 2021. — № 10(3). — С. 176–187. — <https://doi.org/10.33380/2305-2066-2021-10-3-176-187>
11. Паценко М.Б., Балабаньян В.Ю., Гельперина С.Э. Перспективы применения нанотехнологий в лечении бактериальных инфекций (обзор литературы) // *Вестник новых медицинских технологий*. — 2018. — Т. 12, №1. — С. 131–140. — doi: [10.24411/2075-4094-2018-15959](https://doi.org/10.24411/2075-4094-2018-15959)

12. Попов К.А., Федосов С.Р., Малышко В.В., Веревкин А.А., Сторожук А.П., Власов Р.В., Чернобай К.Н., Башинский А.Д., Шевченко А.С., Сторожук П.Г. Экспериментальное обоснование применения нанокластерного серебра для лечения гнойных ран // Кубанский научный медицинский вестник. — 2016. — № 4. — С. 141–146.
13. Ржеусский С.Э. Наночастицы серебра в медицине // Вестник Витебского государственного медицинского университета. — 2022. — Т. 21. — № 2. — С. 15–24.
14. Alshangiti D.M., El-Damhougy T.K., Zaher A., Madani M., Mohamady Ghobashy M. Revolutionizing biomedicine: advancements, applications, and prospects of nanocomposite macromolecular carbohydrate-based hydrogel biomaterials: a review // RSC Adv. — 2023. — № 4. — pp. 51–91. — doi: 10.1039/d3ra07391b
15. Asharani P.V., Hande M.P., Valiyaveetil S. Anti-proliferative activity of silver nanoparticles // BMC Cell Biol. — 2009. — № 17. — pp. 10–65. — doi: 10.1186/1471-2121-10-65
16. Braeuning A., Oberemm A., Görte J., Böhmert L., Juling S., Lampen A. Comparative proteomic analysis of silver nanoparticle effects in human liver and intestinal cells // J Appl Toxicol. — 2018. — № 38(5). — pp. 638–648. — doi: 10.1002/jat.3568
17. Bruna T., Maldonado-Bravo F., Jara P., Caro N. Silver Nanoparticles and Their Antibacterial Applications // Int J Mol Sci. — 2021. — № 4; 22(13). — pp. 7202. — doi: 10.3390/ijms22137202
18. Burduşel A.C., Gherasim O., Grumezescu A.M., Mogoantă L., Ficai A., Andronescu E. Biomedical Applications of Silver Nanoparticles: An Up-to-Date Overview // Nanomaterials (Basel). — 2018. — vol. 31. — № 8(9). — pp. 681. — doi: 10.3390/nano8090681
19. Chen K.S., Chen Wu-Wu, Yeh K.S., Xu K.V., Yu S.J., Xu K.H., Wei T.S., Ho S.N., Tsai P.S., Song Wu-D., Yen H.J., Chen H.A., Yang J.J., Zhuang K.S., Dou H.Wu Silver in the alginate shell of a Nanoparticle as a powerful antimycobacterial agent against Mycobacterium tuberculosis // Front Pharmacol. — 2020. — № 12. — pp. 74. — doi: 10.1126/science. aba5539
20. Chung P.H., Wong C.W., Lai C.K., Siu H.K., Tsang D.N., Yeung K.Y., Ip D.K., Tam P.K. A prospective interventional study to examine the effect of a silver alloy and hydrogel-coated catheter on the incidence of catheter-associated urinary tract infection // Hong Kong Med J. — 2017. — № 23(3). — pp. 239–245. — doi: 10.12809/hkmj164906
21. Dai L., Nadeau B., An X. et al. Silver nanoparticles-containing dual-function hydrogels based on a guar gum-sodium borohydride system // Sci Rep. — 2016. — № 6. — pp. 364–97. — <https://doi.org/10.1038/srep36497>
22. Dhakal T.K., Kumar A., Majumdar R.S., Yadav V. Mechanistic basis of antimicrobial action of silver nanoparticles // Front Microbiol. — 2016. — № 7. — pp. 18–31. — doi: 10.3389/fmicb.2016.01831
23. Dhiman N.K., Agnihotri S., Shukla R. Silver-Based Polymeric Nanocomposites as Antimicrobial Coatings for Biomedical Applications // In: Singh S., Maurya P. (eds) Nanotechnology in Modern Animal Biotechnology. — Springer, Singapore, 2019. — https://doi.org/10.1007/978-981-13-6004-6_4

© Токаев Тимур Казбекович (tthoracic@gmail.com); Штыхно Анна Олеговна (shtykhno@yandex.ru);
Бикбаев Александр Сергеевич (sashabikbaev@gmail.com); Токаев Валерий Казбекович (oncology9@mail.ru);
Синицын Михаил Валерьевич (msinitsyn@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

ОСОБЕННОСТИ ХИРУРГИЧЕСКОГО ЛЕЧЕНИЯ АБДОМИНАЛЬНЫХ ГРЫЖ РОБОТИЗИРОВАННЫМ МЕТОДОМ

CHARACTERISTICS OF SURGICAL TREATMENT OF ABDOMINAL HERNIAS BY ROBOTIC METHOD

S. Khlystunov

Summary. This article is focused on the specifics of surgical treatment of hernias by robotic method. The paper discusses the features and advantages of this method compared to traditional surgical interventions. It describes the technical aspects of robotic surgery. The authors analyze clinical studies demonstrating the effectiveness and safety of the robotic method in the treatment of hernias of various localizations.

Keywords: laparoscopy, ventral hernia, minimally invasive surgery, robotic surgery, mesh implants, abdominal wall reconstruction.

Хлыстунов Станислав Андреевич

«Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова»
stas994@gmail.com

Аннотация. Данная статья посвящена особенностям хирургического лечения грыж роботизированным методом. В работе рассматриваются особенности и преимущества данного метода по сравнению с традиционными хирургическими вмешательствами. Описаны технические аспекты роботизированной хирургии. Проанализированы клинические исследования, демонстрирующие эффективность и безопасность роботизированного метода в лечении грыж различной локализации.

Ключевые слова: лапароскопия, вентральные грыжи, минимально инвазивная хирургия, роботизированная хирургия, сетчатые импланты, реконструкция брюшной стенки.

Введение

Грыжи брюшной стенки (абдоминальные грыжи) представляют собой широко распространенное патологическое состояние, затрагивающее пациентов всех возрастных групп. Согласно исследованиям, грыженосительство наблюдается у значительной части населения земного шара, и статистика не демонстрирует тенденции к сокращению числа таких пациентов [21, 22]. Учитывая распространенность заболевания, хирургическое лечение грыж брюшной стенки занимает значительное место в практической деятельности врачей-хирургов, специализирующихся на общей хирургии. Пациенты с вентральными и послеоперационными грыжами представляют значительную часть клинического контингента в отделениях общей хирургии. Эта тенденция обусловлена несколькими факторами. Во-первых, наблюдается устойчивый рост количества хирургических вмешательств и увеличение объема оперативного пособия [1, 3]. Во-вторых, развитие хирургической техники, достижения анестезиологии и реаниматологии способствуют росту числа операций, что повышает риск развития грыж. Согласно литературным данным [2, 13], 7–24 % пациентов, которым были проведены срединные лапаротомии, в дальнейшем сталкиваются с формированием грыж. Особую значимость проблема приобретает при релапаротомиях [5], где риск развития грыж значительно выше.

Тенденции в хирургии грыж фокусируются на минимально инвазивных техниках, позволяющих избежать обширной диссекции и минимизировать натяжение

в зоне операции. Также разрабатываются методики, позволяющие уменьшить натяжение тканей по линии шва (в т.ч. модификации техники Рамиреса) [19]. Минимально инвазивные методы лечения грыж, включая трансабдоминальное преперитонеальное (TAPP) и тотальное экстраперитонеальное лечение (TEP), используются все чаще как лапароскопическим, так и роботизированным способом, в особенности зарубежом.

Применение роботизированных систем в хирургии грыж

Развитие роботизированной хирургии, в частности, в сфере эндоскопических операций, призвано преодолеть ограничения, присущие традиционным лапароскопическим методикам. Нестабильность видеокamеры, ограниченный диапазон движения инструментов, двухмерное представление операционного поля и неудобные условия труда хирурга, свойственные лапароскопии, стали стимулом для разработки роботизированных систем, которые предлагают более совершенные инструменты и улучшенную эргономику. В последние годы наблюдается растущий интерес к внедрению роботизированных технологий в хирургическую практику, в том числе, в пластику брюшных грыж. Роботизированные комплексы, используемые при хирургии грыж, включают такие системы, как *Da Vinci*, *Hugo* от *Medtronic*, *Medicaid Hinotori*, *Versius* от *CMR* и др. Применение роботизированных систем в хирургии вентральных грыж, особенно в сочетании с новыми методиками лечения, демонстрирует ряд преимуществ. В частности, роботизированная хирургия способствует увеличению доли

эндолапароскопических операций, которые, как доказано, демонстрируют лучшие клинические результаты, особенно при вентральных и осложненных паховых грыжах. Роботизация также облегчает проведение операций через внебрюшинные и ретромультикулярные подходы, традиционно являющиеся технически сложными и трудновыполнимыми при классическом эндолапароскопическом подходе [16].

Традиционные методы хирургии — открытая хирургия и лапароскопические техники, продолжительное время считались основными подходами к лечению грыж. Однако сейчас роботизированные инструменты способны воспроизводить движения человеческой руки с максимальной степенью точности, что позволяет осуществлять сложные маневры в ограниченном пространстве брюшной полости. Это особенно важно при оперативном вмешательстве на грыжах, где высокоточное манипулирование и размещение сетчатых имплантатов играют определяющую роль в достижении успешного исхода при операции, особенно в случаях, когда требуется воздействие на противоположные квадранты живота для подготовки мышечно-фасциальных лоскутов [7]. Несмотря на очевидные преимущества, которые предлагает роботизированная хирургия, клинические исследования, сравнивающие результаты лапароскопических и роботизированных методов, демонстрируют сходство в отношении реабилитации, частоты осложнений и рецидивов. Вопрос об экономической целесообразности применения роботизированной хирургии также остается открытым [17].

Что касается хирургии паховых грыж, исследования показывают, что краткосрочные результаты роботизированных и лапароскопических методов в целом сопоставимы. В ряде исследований применение роботизированных систем в хирургии грыж демонстрирует сокращение послеоперационной боли по сравнению с традиционными лапароскопическими методами [10, 23, 6]. При этом существует тенденция к увеличению времени операции в роботизированном методе [9]. Относительно метода фиксации сетки с помощью роботизированного сшивания, существенные различия в уровне послеоперационной боли на протяжении 1–2 лет по сравнению с лапароскопическим методом не выявляется, что ставит под сомнение влияние метода фиксации на долгосрочную болевую симптоматику [18].

Сравнительные исследования роботизированных и лапароскопических методик при лечении вентральных грыж демонстрируют схожие тенденции. Несмотря на более продолжительное время операции при роботизированном методе операции, среди пациентов есть тенденция сокращения пребывания в стационаре [11, 14, 26]. Эффективность обоих подходов сопоставима как в краткосрочной, так и в долгосрочной перспективе. Подчеркивается, что роботизированная хирургия

особенно удачна при вентральных грыжах, где гибкость роботизированных инструментов помогает более точному закрытию грыжевых дефектов. Несмотря на более продолжительное время операции, роботизированный метод не приводит к увеличению частоты осложнений. В долгосрочной перспективе не выявляется существенных различий между лапароскопическим и роботизированным грыжесечением по показателям рецидива, прочности брюшной стенки и качества жизни [8].

Изначально роботизированный доступ применялся преимущественно для лечения первичных и неосложненных послеоперационных грыж, что позволяло «имитировать» традиционную лапароскопию [24]. Недавние разработки в области роботизированной хирургии позволили реализовать такие методы, как транс абдоминальная ретроперитонеальная пластика (TAR). Одним из преимуществ роботизированного подхода является наличие манипуляторов с возможностью запястного движения, что упрощает процесс наложения швов в труднодоступных зонах, где обычные лапароскопические инструменты малоэффективны. В данной методике роботизированные порты устанавливаются латерально, и ретро ректальное пространство формируется на контралатеральной стороне, где затем выполняется TAR. После этого порты перемещаются на противоположную сторону для установки сетки, которая фиксируется несколькими швами к боковой стенке живота. Затем робот возвращается к первоначальному доступу для завершения процедуры на исходной стороне. Ушивание заднего влагалища прямой мышцы живота и передней фасции осуществляется колющими швами, после чего сетка разворачивается и фиксируется. В качестве меры профилактики скопления жидкости ставится дренаж, аналогично открытой хирургии [4].

В исследовании [15] был проведен сравнительный анализ результатов открытого, лапароскопического и робот-ассистированного (RAS) лечения послеоперационных грыж. Рассматривалась частота принятия обезболивающих и общее качество жизни в зависимости от проведенного типа операции. Результаты показали, что все три метода хирургического устранения грыж эффективны, однако каждый из них имеет свои особенности. Оперативные результаты RAS и лапароскопии были сопоставимы, за исключением увеличенного времени операции при RAS и меньшей частоты конверсий доступа. В сравнении с открытой хирургией, RAS продемонстрировал аналогичное время операции, сокращение периода госпитализации и меньшую частоту повторных операций в течение 30 дней. После проведения RAS у пациентов была меньшая потребность в рецептурных обезболивающих.

Авторами [12] предлагается следующий алгоритм робот-ассистированного лапароскопического вентрального грыжесечения:

1. Определение запросов пациента, согласование с собственными действиями. Либо решение, что эти цели не могут быть достигнуты (в соответствии с симптомами, контуром брюшной стенки и др.);
2. Клинический сценарий. Срочность операции, наличие истории болезни, ресурсы больницы (время в операционной, ассистенты, оборудование, сетка, фиксирующие устройства);
3. Медицинская/хирургическая история. Включает вопросы, связанные с предыдущими инфекциями хирургического поля, инфекциями сетки, местами разрезов и повышенным риском повторной операции в будущем (будущая беременность, онкологические вмешательства, болезнь Крона, закрытие стомы);
4. Особенности грыжи. Расположение, размер дефекта, размер мешка, ассоциированные изменения кожи (изъязвление, некроз, сыпь, растяжение) и окружающие структуры (влияние на фиксацию);
5. Выбор методики, наиболее подходящей для достижения поставленных целей с наименьшей болезненностью.
6. Выбор протеза: того, который соответствует технике и с наибольшей вероятностью реализует цели операции, первоначально поставленные пациентом.

Робот-ассистированный метод интраперитонеального наложения сетки (IPOM). Техника подразумевает, что весь протез или его часть выводится в брюшинную полость. Преимуществом является относительно легкое размещение сетки и отсутствие необходимости закрывать брюшину, даже если для размещения сетки иссекается предбрюшинное пространство, например, при создании большого лоскута для обнажения связок Купера. Диссекция пупочной и/или лоскутной связок может потребовать мобилизации, после установки сетки они не возвращаются в анатомическое положение. Преимуществом по сравнению с экстраперитонеальной сеткой является отсутствие риска послеоперационной грыжи через закрытый перитонеальный лоскут или заднюю прямую мышцу [26]. Обзор 733 лапароскопических операций по устранению вентральных грыж (LVHR) показал, что частота повторных операций составила 17 % в среднем через 2,2 года после операции. Несмотря на опасения относительно спаек с внутрибрюшинной протезной сеткой, лишь 4 % повторных операций привели к незапланированной резекции кишечника, исключительно у пациентов с непроходимостью тонкой кишки. Частота инфицирования сетки составила 2,4 %. Полученные данные позволяют предположить, что опасения по поводу спаек и последующих хирургических осложнений после LVHR могут быть преувеличены [20].

Робот-ассистированная транс абдоминальная преперитонеальная техника (TAPP). Метод предполагает

установку сетки преперитонеально, позади задней стенки прямой мышцы живота и перед брюшиной и/или поперечной фасцией. Преимущества — использование менее дорогостоящей сетки без барьерного покрытия; возможность минимизации фиксации сетки, особенно по краям, что снижает риск образования грыжи между брюшной стенкой и сеткой; сетка располагается в непосредственной близости к брюшной стенке, способствуя более прочному контакту с ней. Что касается недостатков, то это необходимость зашивания брюшины, которая может быть истончена и плохо удерживать швы; дополнительные временные затраты на зашивание брюшины, риск перехода к интраперитонеальному (IPOM) методу в случае невозможности закрыть брюшину; применимость метода для относительно небольших дефектов, как правило, не более 5 см в диаметре [12].

Использование роботизированных систем при LVHR имеет ряд преимуществ за счет увеличения свободы действий хирурга. Роботизированные инструменты делают выполнение сложных манипуляций, в частности, диссекцию грыжевого мешка и внутрибрюшное наложение швов, более доступными для хирургов с различным уровнем опыта в лапароскопической хирургии. Также, они улучшают качество и скорость наложения швов, что способствует увеличению количества случаев первичного закрытия фасции и фиксации сетки к передней брюшной стенке без необходимости использования трансфасциальных швов или фиксаторов. Снижение потребности в трансфасциальных швах и фиксаторах снижает послеоперационный болевой синдром, ускоряет восстановление и улучшает функциональную активность пациента [25].

Заключение

Роботизированное лечение абдоминальных грыж в настоящее время преимущественно развивается за рубежом, пока, не получив широкого распространения в России. Несмотря на увеличение оперативного времени при использовании этой методики, она демонстрирует положительную динамику: повышение частоты первичного закрытия фасции и снижение частоты послеоперационных осложнений. Безопасность робот-ассистированного грыжесечения подтверждается отсутствием увеличения количества осложнений, однако различия в популяциях пациентов требуют дальнейших исследований. Развитие робот-ассистированной хирургии грыж требует проведения дополнительных перспективных исследований для оценки ее эффективности, безопасности и экономической целесообразности, что позволит внедрить эту перспективную технологию и в российскую практику.

ЛИТЕРАТУРА

1. Плешков В.Г., Агафонов О.И. Послеоперационные вентральные грыжи-нерешенные проблемы //Вестник экспериментальной и клинической хирургии. — 2009. — Т. 2. — №. 3. — С. 248–255.
2. Ташкинов Н.В. и др. Выбор способа превентивного эндопротезирования при выполнении срединной лапаротомии //Дальневосточный медицинский журнал. — 2014. — №. 1. — С. 38–40.
3. Тимербулатов М.В. и др. Послеоперационные вентральные грыжи: современное состояние проблемы //Медицинский вестник Башкортостана. — 2013. — Т. 8. — №. 5. — С. 101–107.
4. Хужабаев С.Т., Нарзуллаев Ш.Ш. Современные тенденции в лечении гигантских послеоперационных грыж //Research Focus. — 2023. — Т. 2. — №. 1. — С. 473–482.
5. Шакирова А.Р. и др. Отдалённые результаты хирургического лечения больных, перенёсших релапаротомию //Современные проблемы науки и образования. — 2013. — №. 4. — С. 142–142.
6. Aghayeva A. et al. Laparoscopic totally extraperitoneal vs robotic transabdominal preperitoneal inguinal hernia repair: Assessment of short-and long-term outcomes //The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery. — 2020. — Т. 16. — №. 4. — С. e2111.
7. Anoldo P. et al. Abdominal Wall Hernias—State of the Art of Laparoscopic versus Robotic Surgery //Journal of Personalized Medicine. — 2024. — Т. 14. — №. 1. — С. 100.
8. Anoldo P. et al. Dual docking technique for robotic repair of simultaneous inguinal and umbilical hernia: A preliminary single center experience //The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery. — 2024. — Т. 20. — №. 1. — С. e2586.
9. Ayuso S.A. et al. Laparoscopic versus robotic inguinal hernia repair: a single-center case-matched study //Surgical Endoscopy. — 2023. — Т. 37. — №. 1. — С. 631–637.
10. Choi Y.S. et al. Initial experience of robot-assisted transabdominal preperitoneal (TAPP) inguinal hernia repair by a single surgeon in South Korea //Medicina. — 2023. — Т. 59. — №. 3. — С. 582.
11. Christoffersen M.W., Jørgensen L.N., Jensen K.K. Less postoperative pain and shorter length of stay after robot-assisted retrorectus hernia repair (rRetrorectus) compared with laparoscopic intraperitoneal onlay mesh repair (IPOM) for small or medium-sized ventral hernias //Surgical Endoscopy. — 2023. — Т. 37. — №. 2. — С. 1053–1059.
12. Earle D. Robotic-assisted laparoscopic ventral hernia repair //Surgical Clinics. — 2020. — Т. 100. — №. 2. — С. 379–408.
13. Hanna E.M. et al. Outcomes of a prospective multi-center trial of a second-generation composite mesh for open ventral hernia repair //Hernia. — 2014. — Т. 18. — С. 81–89.
14. LaPinska M. et al. Robotic-assisted and laparoscopic hernia repair: real-world evidence from the Americas Hernia Society Quality Collaborative (AHSQC) //Surgical Endoscopy. — 2021. — Т. 35. — С. 1331–1341.
15. LeBlanc K.A. et al. Robotic-assisted, laparoscopic, and open incisional hernia repair: early outcomes from the Prospective Hernia Study //Hernia. — 2021. — Т. 25. — №. 4. — С. 1071–1082.
16. Lomanto D. et al. Robotic Platform: What It Does and Does Not Offer in Hernia Surgery //Journal of Abdominal Wall Surgery. — 2024. — Т. 3. — С. 12701.
17. Merola G. et al. Is robotic right colectomy economically sustainable? A multicentre retrospective comparative study and cost analysis //Surgical endoscopy. — 2020. — Т. 34. — №. 9. — С. 4041–4047.
18. Miller B.T. et al. Laparoscopic versus robotic inguinal hernia repair: 1-and 2-year outcomes from the RIVAL trial //Surgical endoscopy. — 2023. — Т. 37. — №. 1. — С. 723–728.
19. Mitura K. New techniques in ventral hernia surgery—an evolution of minimally-invasivehernia repairs //Polish Journal of Surgery. — 2020. — Т. 92. — №. 4. — С. 38–46.
20. Patel P.P. et al. Risks of subsequent abdominal operations after laparoscopic ventral hernia repair //Surgical endoscopy. — 2017. — Т. 31. — С. 823–828.
21. Poulouse B.K. et al. Epidemiology and cost of ventral hernia repair: making the case for hernia research //Hernia. — 2012. — Т. 16. — С. 179–183.
22. Sazhin A. et al. Prevalence and risk factors for abdominal wall hernia in the general Russian population //Hernia. — 2019. — Т. 23. — С. 1237–1242.
23. Vitiello A. et al. Minimally invasive repair of recurrent inguinal hernia: multi-institutional retrospective comparison of robotic versus laparoscopic surgery //Journal of Laparoendoscopic & Advanced Surgical Techniques. — 2023. — Т. 33. — №. 1. — С. 69–73.
24. Waite K.E., Herman M.A., Doyle P.J. Comparison of robotic versus laparoscopic transabdominal preperitoneal (TAPP) inguinal hernia repair //Journal of robotic surgery. — 2016. — Т. 10. — С. 239–244.
25. Walker P.A. et al. Multicenter review of robotic versus laparoscopic ventral hernia repair: is there a role for robotics? //Surgical Endoscopy. — 2018. — Т. 32. — С. 1901–1905.
26. Warren J.A. et al. Standard laparoscopic versus robotic retro muscular ventral hernia repair //Surgical endoscopy. — 2017. — Т. 31. — С. 324–332.

© Хлыстунов Станислав Андреевич (stas994@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

Наши авторы

Aganov A. — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Kazan (Volga Region) Federal University»

Altynnikov M. — PhD Student, Irkutsk State University of Railway Engineering

Amelyutin E. — docent, MIREA — Russian Technological University

Arsakhanova G. — PhD, Associate Professor, FGBOU VO «Chechen State University named after. A.A. Kadyrova»

Balter R. — Candidate of medical sciences, Professor, Head of the Department, Samara State Medical University

Barkhatov I. — candidate of medical sciences, head department, Regional Clinical Hospital № 3, Chelyabinsk

Barkhatova E. — South Ural State Medical University

Barkhatova N. — Doctor of Medical Sciences, professor, South Ural State Medical University

Bikbaev A. — Thoracic Surgeon, National Medical Research Center for Phthisiopulmonology and Infectious Diseases

Boryaev R. — Postgraduate Student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Samara State Technical University»

Boyarsky G. — PhD in Engineering, Lead Engineer at the Avionics Center, Moscow Aviation Institute

Bushmanov A. — Ph.D., Associate Professor, Amur State University

Cherny D. — Master's Student, Russian University of Transport

Chernysheva E. — Doctor of Medical Sciences, Head of the Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Astrakhan State Medical University»

Chikrin D. — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Kazan (Volga Region) Federal University»

Chuprina R. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Our authors

Chuvakov A. — PhD, Associate Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Samara State Technical University»

Demichev V. — Docent, Pskov State University; Jewish University, Moscow

Doroshilova A. — Scientific Research Institute of Complex Problems of Hygiene and Occupational Diseases, Novokuznetsk

Egorchev A. — PhD, Director, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Kazan (Volga Region) Federal University»

Erofeevskaya L. — Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Institute of Oil and Gas Problems SB RAS (is a separate division) Federal Research Center «Yakut Scientific Center Siberian Branch Russian Academy of Sciences»

Fahrutdinov A. — Leading Software Engineer, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Kazan (Volga Region) Federal University»

Fang Jiwen — Specialist, Repair Department, Huadian-Teninskaya Combined Cycle Power Plant

Fatyanova A. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Sechenov Moscow State Medical University (Sechenov University)

Firsova T. — Associate Professor, Academy State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia

Gimadutdinov R. — postgraduate student, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Kazan (Volga Region) Federal University»

Gladun V. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Grachev V. — Resident Physician, Volga Region Research Medical University, Vladimir branch

Gracheva E. — Associate Professor, Candidate of Biological Sciences, Vladimir State University

Gulyaeva O. — Senior Researcher, Scientific Research Institute of Complex Problems of Hygiene and Occupational Diseases, Novokuznetsk

Ilchenko O. — Candidate of Medical Sciences, Assistant, Samara State Medical University

Isaeva S. — Resident, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Astrakhan State Medical University»

Ivanov E. — MIREA – Russian Technological University

Ivanova T. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Samara State Medical University

Kamyshanov D. — Graduate Student, Mathematics and Information Technology, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration

Kapralov S. — Doctor of Medical Sciences, Associate Professor, Head of the Department, Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky

Karasev I. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Head of the Endoscopy, N.N. Blokhin National Medical Research Center of Oncology, Moscow

Kazitskaya A. — Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher, Scientific Research Institute of Complex Problems of Hygiene and Occupational Diseases, Novokuznetsk

Khakov E. — Graduate Student, Mathematics and Information Technology, Russian Presidential Academy of National Economy, and Public Administration, Moscow

Khlystunov S. — «Military Medical Academy named after S.M. Kirov»

Khomutinnikov M. — postgraduate student, Russian Presidential Academy of National Economy, and Public Administration

Kochetova E. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Petrozavodsk State University

Kopyltsov V. — Deputy General Designer, Head of Department, Special Technology Center, St. Petersburg

Kotelnikova N. — Samara State Medical University

Kravchenko A. — Academy State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia

Kychkin A. — Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems North SB RAS (is a separate division) Federal State Budgetary Scientific Institution Federal Research Center «Yakut Scientific Center Siberian Branch Russian Academy of Sciences»

Lipnitskaya E. — Head of the Cardiology Department, Head of the Regional Vascular Center, State Budgetary Healthcare Institution of the Astrakhan region, Alexander-Mariinsky Regional Clinical Hospital

Lobaev I. — Candidate of Technical Sciences, Professor, Academy State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia

Lozhkova A. — Postgraduate Student, Amur State University

Luzina F. — Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher, Scientific Research Institute of Complex Problems of Hygiene and Occupational Diseases, Novokuznetsk

Maksimchuk I. — dentist-surgeon, Advanced Medical Innovations Clinic North LLC, St. Petersburg

Malinin I. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Maslyakov V. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky; Doctor of Medical Sciences, Professor, Professor of the Department, Medical University «Reaviz», Saratov

Medunetsky V. — Doctor of Technical Sciences, Professor, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

Meshalkin E. — Doctor of Technical Sciences, Professor, Academy State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia

Molodyakov S. — Doctor of technical Sciences, Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Moskalev A. — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk

Muratova S. — Cardiologist, Medsi Group of Companies

Nuyakshin M. — Postgraduate, Department of System Analysis and Management Dubna State University

Palevskaya S. — Doctor of Medical Sciences, Vice-Rector, Director, Samara State Medical University

Pantukhin A. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Paveliev M. — PhD, research fellow, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Kazan (Volga Region) Federal University»

Petrunina A. — Senior Lecturer, Siberian Federal University, Krasnoyarsk

Polidanov M. — specialist, Medical University «Reaviz», St. Petersburg

Ponomareva M. — dentist-resident surgeon, CHOU «St. Petersburg Institute of Dentistry of Postgraduate Education»

Priymak A. — Russian Technological University (RTU MIREA)

Prokhnitsky A. — Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky

Pugacheva T. — Candidate of medical sciences, Assistant, Samara State Medical University

Reshetnikov D. — MIREA – Russian Technological University

Reshetov I. — Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor, Doctor of Medical Sciences, Head of the Department, I.M. Sechenov Moscow State Medical University (Sechenov University)

Rogozhkin V. — Adjunct, Academy of Management of the Ministry of Internal Affairs of Russia

Roshchin E. — Candidate of Medical Sciences, Chief Physician, Orthopedic dentist, orthodontist, Sdi Dent Clinic

Rybak A. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Honorary Worker of Education of the Russian Federation, Professor, Far Eastern Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia

Sabinin O. — Candidate of Sciences, Associate Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Safronov D. — Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky

Saltykova A. — postgraduate student, Junior researcher Federal State Budgetary Institution of Science Federal Research Center «Yakut Scientific Center Siberian Branch Russian Academy of Sciences»

Selezneva A. — Oncologist, post-graduate student, Academy of Postgraduate Education of the Federal State Budgetary Institution FNCC FMBA of Russia

Selin A. — docent, MIREA — Russian Technological University

Serzhantova M. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

Shagimov N. — Resident, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Astrakhan State Medical University»

Shao Chengyue — Postgraduate student, Belarusian State University

Shipulin G. — PhD in Law, Associate Professor, Russian Technological University (RTU MIREA)

Shtykhno A. — Ultrasound diagnostics doctor, State Budgetary Healthcare Institution «Moscow Scientific and Practical Center for Tuberculosis Control»

Sinitsyn M. — Doctor of Medical Sciences, Associate Professor, Deputy Chief Physician, National Medical Research Center for Phthiopulmonology and Infectious Diseases; Professor, N.I. Pirogov Russian National Research Medical University

Strauss V. — Candidate of Psychological Sciences, Director, ANO DPO «UC «Sintez»

Sulaev E. — Medical University «Reaviz», St. Petersburg

Sultanova O. — Candidate of Medical Sciences, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Astrakhan State Medical University»

Sultanova S. — Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Astrakhan State Medical University»

Tekeeva G. — Resident, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Astrakhan State Medical University»

Tokaev T. — Researcher, NMIC of Phthiopulmonology and Infectious Diseases; Thoracic surgeon, State Budgetary Healthcare Institution «Moscow Scientific and Practical Center for Tuberculosis Control»

Tokaev V. — Candidate of Medical Sciences, Oncologist, P.A. Herzen Moscow Scientific Research Institute

Tselkovich L. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Samara State Medical University

Tsygankov N. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk

Turusov R. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Vetoshkin N. — Graduate student, Russian Presidential Academy of National Economy, and Public Administration

Vit A. — postgraduate student, engineer, The Institute Oil and Gas Problems SB RAS (is a separate division) Federal Research Center «Yakut Scientific Center Siberian Branch Russian Academy of Sciences»

Vysotsky R. — Jewish University, Moscow

Wang Guyue — Specialist, Production and Technical Department, Huadian-Teninskaya Combined Cycle Power Plant

Wang Zedong — Engineer, Chn Energy Star Technology Co.ltd

Yadykina T. — Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher, Scientific Research Institute of Complex Problems of Hygiene and Occupational Diseases, Novokuznetsk

Yevtushenkov A. — Doctor of science (biology), full professor, Belarusian State University

Zhu Kunhao — DPhil, Belarusian State University

Zhukova A. — Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Head of the Laboratory, Scientific Research Institute of Complex Problems of Hygiene and Occupational Diseases, Novokuznetsk

Zou Lingyu — Teacher, Heilongjiang University

Требования к оформлению статей, направляемых для публикации в журнале



Для публикации научных работ в выпусках серий научно-практического журнала «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики» принимаются статьи на русском языке. Статья должна соответствовать научным требованиям и общему направлению серии журнала, быть интересной достаточно широкому кругу российской и зарубежной научной общественности.

Материал, предлагаемый для публикации, должен быть оригинальным, не опубликованным ранее в других печатных изданиях, написан в контексте современной научной литературы, и содержать очевидный элемент создания нового знания. Представленные статьи проходят проверку в программе «Антиплагиат».

За точность воспроизведения дат, имен, цитат, формул, цифр несет ответственность автор.

Редакционная коллегия оста вляет за собой право на редактирование статей без изменения научного содержания авторского варианта.

Научно-практический журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики» проводит независимое (внутреннее) рецензирование.

Правила оформления текста.

- ◆ Текст статьи набирается через 1,5 интервала в текстовом редакторе Word для Windows с расширением “.doc”, или “.rtf”, шрифт 14 Times New Roman.
- ◆ Перед заглавием статьи указывается шифр согласно универсальной десятичной классификации (УДК).
- ◆ Рисунки и таблицы в статью не вставляются, а даются отдельными файлами.
- ◆ Единицы измерения в статье следует выражать в Международной системе единиц (СИ).
- ◆ Все таблицы в тексте должны иметь названия и сквозную нумерацию. Сокращения слов в таблицах не допускается.
- ◆ Литературные источники, использованные в статье, должны быть представлены общим списком в ее конце. Ссылки на упомянутую литературу в тексте обязательны и даются в квадратных скобках. Нумерация источников идет в последовательности упоминания в тексте.
- ◆ Литература составляется в соответствии с ГОСТ 7.1-2003.
- ◆ Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Правила написания математических формул.

- ◆ В статье следует приводить лишь самые главные, итоговые формулы.
- ◆ Математические формулы нужно набирать, точно размещая знаки, цифры, буквы.
- ◆ Все использованные в формуле символы следует расшифровывать.

Правила оформления графики.

- ◆ Растровые форматы: рисунки и фотографии, сканируемые или подготовленные в Photoshop, Paintbrush, Corel Photopaint, должны иметь разрешение не менее 300 dpi, формата TIF, без LZW уплотнения, CMYK.
- ◆ Векторные форматы: рисунки, выполненные в программе CorelDraw 5.0-11.0, должны иметь толщину линий не менее 0,2 мм, текст в них может быть набран шрифтом Times New Roman или Arial. Не рекомендуется конвертировать графику из CorelDraw в растровые форматы. Встроенные — 300 dpi, формата TIF, без LZW уплотнения, CMYK.

По вопросам публикации следует обращаться к шеф-редактору научно-практического журнала «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики» (e-mail: redaktor@nauteh.ru).