

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЖУРНАЛ ПРИКЛАДНЫХ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

№ 4 2026

Научный журнал

Журнал основан в 2007 году

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

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Стукова Наталия Юрьевна, к.м.н.

Технический редактор Доронкина Е.Н.

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

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

Бизенкова Мария Николаевна, к.м.н.

Зав. редакцией Шнуровозова Т.В.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

ISSN 1996-3955

Двухлетний импакт-фактор РИНЦ = 0,556

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ = 0,357

Периодичность

12 номеров в год

Учредитель, издатель и редакция

ООО НИЦ «Академия Естествознания»

Почтовый адрес

105037, г. Москва, а/я 47

Адрес редакции и издателя

410056, г. Саратов, ул. им. Чапаева В.И., д. 56

Типография

ООО «НИЦ Академия Естествознания»

410035, г. Саратов, ул. Мамонтовой, д. 5

E-mail

edition@rae.ru

Телефон

+7 (499) 705-72-30

Подписано в печать

30.09.2026

Дата выхода номера

30.10.2026

Формат

60x90 1/8

Усл. печ. л.

6,5

Тираж

100 экз.

Заказ

МЖПиФИ 2026/4

Распространяется по свободной цене

© ООО НИЦ «Академия Естествознания»

INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED AND FUNDAMENTAL RESEARCH

№ 4 2026

Scientific journal

The journal is based in 2007

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

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

CHIEF EDITOR

Stukova Natalia Yurievna, Cand. Sci. (Medical)

Technical editor Doronkina E.N.

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

EXECUTIVE SECRETARY

Bizenkova Maria Nikolaevna, Cand. Sci. (Medical)

Head of the editorial board Shnurovozova T.V.

EDITORIAL BOARD

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

ISSN 1996-3955

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

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

Periodicity	12 issues per year		
Founder, publisher and editors	LLC PH Academy of Natural History		
Mailing address	105037, Moscow, p.o. box 47		
Editorial and publisher address	410056, Saratov, st. them. Chapaeva V.I., 56		
Printing house	LLC SPC Academy of Natural History 410035, Saratov, st. Mamontova, 5		
E-mail	edition@rae.ru	Telephone	+7 (499) 705-72-30
Signed for print	30.09.2026	Number issue date	30.10.2026
Format	60x90 1/8	Conditionally printed sheets	6,5
Circulation	100 copies	Order	МЖПиФИ 2026/4

Distribution at a free price

© LLC PH Academy of Natural History

СОДЕРЖАНИЕ

МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ

СТАТЬИ

SWOT-АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ФАРМАКОНАДЗОРА
В КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКЕ

Касымалиева А., Исмаилов И. З., Жумагулова Ж. О., Барбиева Э. Б. 5

СВЯЗЬ УРОВНЕЙ БИОМАРКЕРОВ СИНОВИАЛЬНОЙ
ЖИДКОСТИ СО СПЕКТРОМ ВОЗБУДИТЕЛЕЙ
ПЕРИПРОТЕЗНОЙ ИНФЕКЦИИ СУСТАВОВ

Плиска Н. Н. 13

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

РОЛЬ РЕЦЕПТОРОВ ЭСТРОГЕНОВ В ПРОЦЕССАХ
ВОЗРАСТНЫХ АРТЕРИАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ

Зинеби Иршад, Бажиг Аюб, Максимюк Н. Н., Хусейнаева Ф. Д. 21

СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ НАУКИ

СТАТЬЯ

ЗОНАЛЬНАЯ СИСТЕМА ЗЕМЛЕДЕЛИЯ РЕСПУБЛИКИ ТЫВА

Кузьмина Е. Е., Донгак М. М. 36

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

ТРЕХМЕРНАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ И МУЛЬТИМОДАЛЬНЫЙ
АНАЛИЗ ДНИЩА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Белкин Е. Н. 42

CONTENTS

MEDICAL SCIENCES

ARTICLES

SWOT-ANALYSIS OF THE PHARMACOVIGILANCE SYSTEM IN THE KYRGYZ REPUBLIC

Kasymalieva A., Ismailov I. Z., Zhumagulova Zh. O., Barbieva E. B. 5

THE RELATIONSHIP BETWEEN SYNONIAI FLUID BIOMARKER LEVELS AND THE SPECTRUM OF CAUSATIVE AGENTS IN PERIPROSTHETIC JOINT INFECTION

Pliska N. N. 13

REVIEW

THE ROLE OF ESTROGEN RECEPTORS IN AGING-RELATED ARTERIAL CHANGES

Zinebi Irshad, Bajji Ayoub, Maksimyuk N. N., Khuseynaeva F. D. 21

AGRICULTURAL SCIENCES

ARTICLE

ZONAL AGRICULTURAL SYSTEM OF THE REPUBLIC OF TUVA

Kuzmina E. E., Dongak M. M. 36

TECHNICAL SCIENCES

REVIEW

THREE-DIMENSIONAL RECONSTRUCTION AND MULTIMODAL ANALYSIS OF VEHICLE UNDERCARRIAGES

Belkin E. N. 42



SWOT-АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ФАРМАКОНАДЗОРА В КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКЕ

¹Касымалиева А. ORCID ID 0009-0007-6740-2548,

²Исмаилов И. З. ORCID ID 0000-0002-1468-8251,

³Жумагулова Ж. О. ORCID ID 0000-0002-5226-5380,

²Барбиева Э. Б. ORCID ID 0000-0003-2516-4231

¹Международный университет Кыргызстана, Бишкек, Кыргызская Республика;

²Институт химии и фитотехнологии Национальной академии наук Кыргызской Республики,
Бишкек, Кыргызская Республика;

³Департамент лекарственных средств и медицинских изделий при Министерстве
здравоохранения Кыргызской Республики, Бишкек, Кыргызская Республика,
e-mail: ism-isa@mail.ru

Фармаконадзор является важнейшим компонентом системы обеспечения безопасности лекарственных средств и направлен на выявление, оценку и предупреждение нежелательных лекарственных реакций в реальной клинической практике. В условиях роста ассортимента лекарственных препаратов и высокой доли импортируемых лекарственных средств вопросы совершенствования системы фармаконадзора в Кыргызской Республике приобретают особую актуальность. Целью исследования явился SWOT-анализ современной системы фармаконадзора Кыргызской Республики с определением ее сильных и слабых сторон, возможностей развития и потенциальных угроз. Материалом исследования послужили нормативно-правовые акты Кыргызской Республики, данные Департамента лекарственных средств и медицинских изделий при МЗ КР, публикации ВОЗ и научные источники, посвященные вопросам лекарственной безопасности. Использованы методы системного, сравнительного и SWOT-анализа. Установлено, что система фармаконадзора Кыргызской Республики обладает сформированной институциональной структурой, нормативно-правовой базой и интеграцией с международной системой мониторинга ВОЗ VigiBase. Важными преимуществами являются развитие электронного репортирования, участие страны в международной программе мониторинга безопасности лекарственных средств, а также внедрение элементов активного фармаконадзора. Вместе с тем сохраняются проблемы недостаточного репортирования нежелательных реакций, ограниченных кадровых и аналитических ресурсов, отсутствия интеграции фармаконадзора с клиническими информационными системами и низкой вовлеченности пациентов. Показано, что перспективными направлениями развития являются цифровизация процессов фармаконадзора, расширение программ обучения медицинских работников и пациентов, развитие активного мониторинга безопасности и интеграция с системами прослеживаемости лекарственных средств. Реализация данных мер позволит повысить эффективность системы лекарственной безопасности и минимизировать риски фармакотерапии для населения.

Ключевые слова: фармаконадзор, лекарственная безопасность, нежелательные лекарственные реакции, SWOT-анализ, VigiBase

SWOT-ANALYSIS OF THE PHARMACOVIGILANCE SYSTEM IN THE KYRGYZ REPUBLIC

¹Kasymalieva A. ORCID ID 0009-0007-6740-2548,

²Ismailov I. Z. ORCID ID 0000-0002-1468-8251,

³Zhumagulova Zh. O. ORCID ID 00000-0002-5226-5380,

²Barbieva E. B. ORCID ID 0000-0003-2516-4231

¹International University of Kyrgyzstan, Bishkek, Kyrgyz Republic;

²Institute of Chemistry and Phytotechnology of the National Academy of Sciences
of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyz Republic;

³Department of Medicines and Medical Devices under the Ministry of Health
of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyz Republic, e-mail: ism-isa@mail.ru

Pharmacovigilance is an essential component of the medicinal product safety system aimed at the detection, assessment, and prevention of adverse drug reactions in real clinical practice. In the context of the expanding range of medicinal products and the high proportion of imported medicines, improving the pharmacovigilance system in the Kyrgyz Republic has become particularly relevant. The aim of the study was to conduct a SWOT analysis of the current pharmacovigilance system in the Kyrgyz Republic by identifying its strengths, weaknesses, development opportunities, and potential threats. The study materials included regulatory and legal documents of the Kyrgyz

Republic, data from the Department of Medicines and Medical Devices under the Ministry of Health of the Kyrgyz Republic, WHO publications, and scientific sources devoted to medicine safety issues. Systemic, comparative, and SWOT analysis methods were applied. The study demonstrated that the pharmacovigilance system of the Kyrgyz Republic possesses an established institutional structure, a regulatory framework, and integration with the WHO international monitoring system VigiBase. Significant advantages include the development of electronic reporting, participation in the international drug safety monitoring program, and the implementation of elements of active pharmacovigilance. At the same time, problems remain related to underreporting of adverse drug reactions, limited human and analytical resources, lack of integration with clinical information systems, and low patient involvement. The study showed that promising areas for further development include digitalization of pharmacovigilance processes, expansion of educational programs for healthcare professionals and patients, development of active safety monitoring, and integration with medicine traceability systems. The implementation of these measures will improve the effectiveness of the medicine safety system and minimize pharmacotherapy risks for the population.

Keywords: pharmacovigilance, drug safety, adverse drug reactions, SWOT analysis, VigiBase

Введение

Фармаконадзор является ключевым элементом системы лекарственной безопасности, обеспечивающим выявление, оценку, мониторинг и предотвращение нежелательных лекарственных реакций (НЛР), а также иных проблем, связанных с применением лекарственных средств на всех этапах их жизненного цикла [1–3]. Особое значение фармаконадзор приобретает на пострегистрационном этапе, когда лекарственный препарат начинает широко применяться в реальной клинической практике среди различных групп пациентов, включая лиц с сопутствующими заболеваниями, полипрагмазией и особыми физиологическими состояниями [4–6]. Именно в условиях повседневного применения могут выявляться редкие, отсроченные или ранее не зарегистрированные побочные эффекты, которые невозможно полностью установить в рамках ограниченных по времени и численности клинических исследований. Согласно данным ВОЗ, нежелательные реакции на лекарственные препараты входят в число ведущих причин госпитализации, инвалидизации и смертности населения во многих странах мира. По оценкам международных исследований, значительная доля НЛР является потенциально предотвратимой и связана с ошибками назначения, взаимодействием лекарственных средств, нарушением режима дозирования или недостаточным мониторингом состояния пациента [7, 8]. В этой связи фармаконадзор рассматривается как неотъемлемый компонент системы обеспечения качества и безопасности медицинской помощи, направленный на минимизацию рисков фармакотерапии и повышение эффективности лечения. Современная система фармаконадзора включает сбор и анализ спонтанных сообщений о НЛР, проведение постмаркетинговых исследований безопасности, активный мониторинг применения лекарственных средств, а также использование международных баз данных и цифровых технологий для вы-

явления сигналов безопасности. Важную роль играют национальные регуляторные органы, медицинские работники, фармацевтические организации и сами пациенты, участвующие в процессе регистрации и передачи информации о неблагоприятных последствиях лекарственной терапии.

В последние годы особую актуальность приобретают вопросы совершенствования национальных систем фармаконадзора, интеграции электронных систем отчетности, повышения уровня информированности медицинских работников и внедрения риск-ориентированных подходов к мониторингу безопасности лекарственных средств. Развитие международного сотрудничества и обмена информацией между странами позволяет своевременно выявлять потенциальные угрозы, принимать регуляторные решения и обеспечивать более высокий уровень защиты здоровья населения [9, 10].

Обеспечение безопасности применения лекарственных средств является одним из приоритетных направлений современной системы здравоохранения [11]. Для Кыргызской Республики эта проблема имеет особую значимость в связи с активным развитием фармацевтического рынка, увеличением импорта лекарственных средств, расширением программ государственного лекарственного обеспечения и необходимостью гармонизации национального законодательства с международными требованиями и стандартами Евразийского экономического союза. Несмотря на проводимые реформы в области обращения лекарственных средств, система фармаконадзора в стране продолжает сталкиваться с рядом организационных, нормативных и кадровых проблем, влияющих на эффективность выявления, регистрации и предупреждения нежелательных реакций [12–14].

На современном этапе особую актуальность приобретает комплексная оценка состояния системы фармаконадзора с использованием методов стратегического анализа, одним из которых является SWOT-анализ, позволяющий выявить сильные и слабые сторо-

ны системы, а также определить возможности и угрозы для ее дальнейшего развития [15].

Проведение SWOT-анализа системы фармаконадзора Кыргызской Республики позволяет:

- оценить уровень организации мониторинга безопасности лекарственных средств;
- определить основные проблемы функционирования системы фармаконадзора;
- выявить факторы, способствующие совершенствованию национальной системы лекарственной безопасности;
- определить направления оптимизации нормативно-правовой базы, цифровизации процессов и повышения квалификации медицинских и фармацевтических работников;
- разработать практические рекомендации по повышению эффективности выявления и регистрации нежелательных реакций лекарственных средств.

Особую значимость исследованию придает необходимость повышения информированности медицинских работников о принципах фармаконадзора, совершенствования механизмов межведомственного взаимодействия и внедрения современных цифровых технологий в процессы мониторинга безопасности лекарственных препаратов. Важным фактором также является недостаточный уровень спонтанного сообщения о нежелательных реакциях, что может приводить к недооценке рисков фармакотерапии и снижению эффективности системы лекарственной безопасности.

Таким образом, проведение SWOT-анализа системы фармаконадзора в Кыргызской Республике является актуальным и практически значимым направлением научного исследования, результаты которого могут быть использованы для совершенствования государственной политики в области лекарственной безопасности, повышения эффективности фармаконадзора и минимизации рисков, связанных с применением лекарственных средств.

Цель исследования – провести SWOT-анализ системы фармаконадзора в Кыргызской Республике с использованием индикаторов системы фармаконадзора.

Материалы и методы исследования

В исследовании применен метод SWOT-анализа, позволяющий систематизировать факторы внутренней и внешней среды системы фармаконадзора Кыргызской Республики по четырем аналитическим блокам: Strengths (S) – сильные стороны, Weaknesses (W) – слабые стороны, Opportunities (O) – возможности и Threats (T) – угрозы.

Период исследования охватывал 2021–2025 гг., что позволило провести комплекс-

ную оценку текущего состояния и тенденций развития национальной системы фармаконадзора.

Рассмотрены нормативно-правовые акты Кыргызской Республики, регулирующие сферу обращения лекарственных средств и функционирование системы фармаконадзора; документы, регламентирующие деятельность Департамента лекарственных средств и медицинских изделий при Министерстве здравоохранения Кыргызской Республики (ДЛСМИ при МЗ КР); международные документы методического характера Всемирной организации здравоохранения, включая Programme for International Drug Monitoring (PIDM), глобальную базу данных сообщений о нежелательных реакциях VigiBase и руководства Good Pharmacovigilance Practices (GVP); официальные статистические данные системы фармаконадзора Кыргызской Республики за 2021–2025 гг.; демографические показатели Кыргызской Республики, включая данные о численности населения (около 7,2 млн чел.), полученные из данных Национального статистического комитета Кыргызской Республики.

Для количественной оценки использованы международные ориентировочные показатели частоты возникновения нежелательных лекарственных реакций (5–10 случаев на 1000 пациентов в год), а также показатели полноты регистрации сообщений в пассивных системах фармаконадзора (2–10 % от предполагаемого числа случаев).

Отбор факторов для SWOT-анализа осуществлялся на основании критериев значимости для функционирования системы фармаконадзора, частоты упоминания в нормативных и аналитических документах, потенциального влияния на эффективность выявления и регистрации нежелательных лекарственных реакций, а также возможности управленческого воздействия.

Классификация факторов по категориям S/W/O/T проводилась методом экспертно-аналитической оценки: внутренние характеристики системы (организационные, кадровые, информационные и регуляторные особенности) относились к категориям сильных и слабых сторон, тогда как внешние условия (международное сотрудничество, цифровизация, социально-экономические и институциональные риски) классифицировались как возможности или угрозы. Итоговая интерпретация результатов проводилась на основе сопоставления выявленных факторов и оценки их потенциального влияния на развитие системы фармаконадзора Кыргызской Республики.

Результаты исследования и их обсуждение

В Кыргызской Республике вопросы обеспечения лекарственной безопасности и развития системы фармаконадзора приобретают все большую актуальность в условиях модернизации национальной системы здравоохранения и гармонизации нормативно-правовой базы с международными требованиями и стандартами. Государственная политика в данной области направлена на совершенствование механизмов контроля качества, эффективности и безопасности лекарственных средств на всех этапах их обращения – от регистрации и производства до реализации и медицинского применения.

Ключевую роль в реализации государственной политики в сфере обращения лекарственных средств осуществляет Департамент лекарственных средств и медицинских изделий при МЗ КР, деятельность которого направлена на государственный контроль качества лекарственных препаратов, лицензирование фармацевтической деятельности, мониторинг безопасности лекарственных средств и координацию мероприятий в области фармаконадзора. В структуре уполномоченного органа функционируют подразделения, ответственные за регистрацию лекарственных средств, фармаконадзор, инспектирование и контроль качества фармацевтической продукции.

Существенным этапом совершенствования системы лекарственной безопасности в Кыргызской Республике стало принятие ряда нормативных правовых актов, направленных на усиление государственного регулирования в сфере обращения лекарственных средств. В частности, Закон Кыргызской Республики от 12 января 2024 г. № 13 «Об обращении лекарственных средств» устанавливает обязательные требования к разработке, производству, хранению, транспортировке, реализации и мониторингу безопасности лекарственных препаратов. Документ предусматривает внедрение международных стандартов надлежащей лабораторной и клинической практики (GLP, GCP), а также обязательный мониторинг побочных реакций и соотношения «польза – риск» лекарственных средств. Дополнительным направлением усиления лекарственной безопасности стало утверждение в 2024 г. Порядка проведения фармаконадзора, который регламентирует механизмы выявления, регистрации, анализа и предупреждения нежелательных реакций на лекарственные препараты. Важность данного документа заключается в систематизации процедур спонтанного репор-

тирования, определении обязанностей держателей регистрационных удостоверений и медицинских работников, а также усилении контроля за пострегистрационным мониторингом безопасности лекарственных средств.

Эффективность функционирования системы фармаконадзора в значительной степени определяется активностью медицинских и фармацевтических работников, осуществляющих непосредственное наблюдение за пациентами в процессе лечения. Врачи и фармацевты являются ключевыми участниками системы выявления нежелательных реакций, поскольку именно они имеют возможность своевременно фиксировать изменения состояния пациентов, потенциально связанные с применением лекарственных препаратов. Очень важны уровень профессиональной подготовки специалистов, их информированность о принципах фармаконадзора, а также готовность направлять сообщения о выявленных нежелательных реакциях в уполномоченные органы и фармацевтическим производителям.

Таким образом, реализуемые в Кыргызской Республике регуляторные меры свидетельствуют о постепенном укреплении национальной системы лекарственной безопасности и фармаконадзора. Совершенствование нормативно-правовой базы, внедрение механизмов прослеживаемости лекарственных средств, усиление государственного контроля качества продукции и развитие системы мониторинга нежелательных реакций способствуют повышению безопасности фармакотерапии и обеспечению защиты здоровья населения.

По состоянию на 2025 г. в Государственном реестре Кыргызской Республики зарегистрировано 6987 наименований лекарственных средств. Из общего числа зарегистрированных препаратов продукция отечественных производителей составляет 645 наименований, тогда как доля зарегистрированных импортных лекарственных средств достигает 90,7 %, что свидетельствует о высокой зависимости национального фармацевтического рынка от зарубежных поставок лекарственной продукции. [<https://www.dlsmi.kg/>]. Эффективность фармаконадзора приобретает особое значение с учетом того, что в Кыргызской Республике 97 % лекарственных средств являются импортируемыми и поставляются производителями из 53 стран мира: Индия – 15 %, Российская Федерация – 14 %, Турция – 11 %, Германия – 7 %, Швейцария – 5 %, Украина – 5 %, Словения – 4 %, Польша – 3 %, Италия – 3 %, Чешская Республика – 2 %, прочие страны – 31 %.

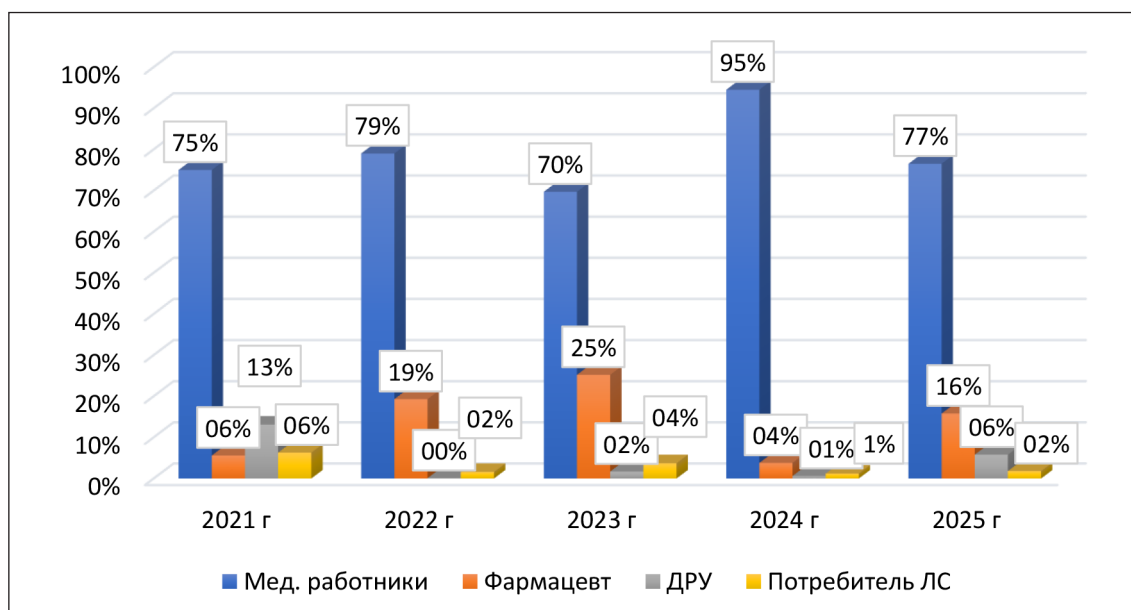


Рис. 1. Репортеры карт-сообщений о нежелательных реакциях лекарственных средств за 2021–2025 гг.

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Как известно, даже строго контролируемые клинические испытания обладают ограниченными возможностями для выявления редких и отсроченных нежелательных лекарственных реакций. Поэтому профиль безопасности формируется преимущественно на этапе пострегистрационного мониторинга, после широкого применения лекарственных средств в клинической практике. Пострегистрационный мониторинг НЛР является одним из основных инструментов управления рисками при использовании лекарственных средств.

При проведении анализа структуры репортеров о побочных эффектах за 2021–2025 гг. установлено, что наибольшую активность проявляют медицинские работники. В рассматриваемый период их доля варьировала в пределах от 69,4 до 94,5 %, что указывает на ведущую роль медработников в системе выявления и регистрации НР (рис. 1).

Выявленные тенденции свидетельствуют о доминирующей роли медицинских работников в системе фармаконадзора и сравнительно низкой вовлеченности других групп репортеров. Нестабильная динамика участия держателей регистрационных удостоверений в этом процессе может указывать на влияние организационных, регуляторных или мотивационных факторов. Резкое увеличение данного показателя в 2025 г., вероятно, связано с усилением требований к фармаконадзору, внедрением механизмов

контроля или повышением ответственности медицинских работников за мониторинг безопасности лекарственных средств.

В Кыргызской Республике активно внедряются современные цифровые решения в области фармаконадзора. Создан iEmdoo, позволяющий проводить ежедневный мониторинг побочных реакций после иммунизации (ПППИ), обеспечивать оперативное выявление сигналов безопасности и поддерживать доверие населения к программам вакцинации.

Также внедрено мобильное приложение «Дары-дармек», обеспечивающее возможность электронного репортирования о нежелательных реакциях как медицинскими работниками, так и пациентами.

Национальная система фармаконадзора интегрирована с международной базой данных Vigibase ВОЗ, что позволяет своевременно обмениваться информацией о безопасности лекарственных средств и участвовать в глобальном мониторинге нежелательных реакций.

Авторами проведен анализ динамики количества карт-сообщений о побочных эффектах лекарственных средств (ПЭ ЛС), поступивших в адрес уполномоченного органа за 2020–2025 гг. (рис. 2). Установлено, что в результате активного наблюдения в 2022 г. было выявлено 2518 случаев, из них абсолютное большинство (98,3 %) сообщений являются нежелательными лекарственными реакциями.

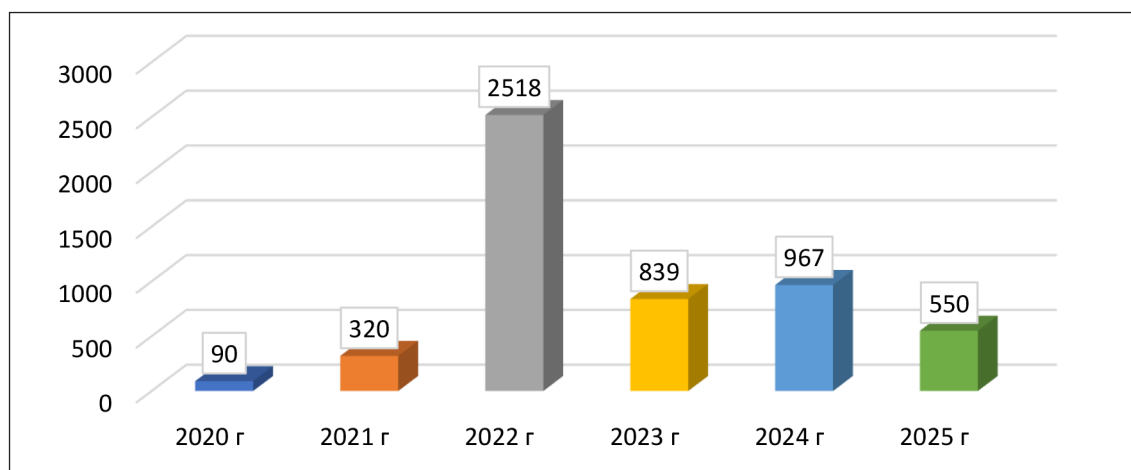


Рис. 2. Динамика числа поступивших карт-сообщений о побочных эффектах лекарственных средств за 2020–2025 гг.
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

SWOT-анализ

Strengths (Сильные стороны)

1. Институциональная система по регулированию обращения лекарственных средств и медицинских изделий

В Кыргызской Республике действует государственный регулятор в сфере обращения лекарственных средств и медицинских изделий – ДЛСМИ при МЗ КР, в нем функционирует отдел фармаконадзора, аккумулирующий сообщения о НЛР в национальной базе данных. Это снижает транзакционные издержки координации фармаконадзора и создает условия для единых стандартов репортинга.

2. Международная интеграция (ВОЗ, VigiBase)

Членство в PIDM с 2003 г. обеспечивает:

- 1) доступ к глобальной базе данных VigiBase;
- 2) методологическую поддержку ВОЗ;
- 3) сопоставимость национальных сигналов с международными данными.

3. Нормативно-правовое регулирования фармаконадзора

Обязанности по репортированию НЛР закреплены:

- за медицинскими работниками,
- фармацевтами,
- держателями регистрационных удостоверений (ДРУ).

Также информация о подозреваемых нежелательных реакциях на лекарственные препараты может отправляться потребителями и/или их родственниками.

Это формирует юридическую основу для контроля комплаенса и внедрения KPI.

4. Опыт активного фармаконадзора (aDSM)

В противотуберкулезных программах, реализуемых в Кыргызстане, применяются элементы активного мониторинга безопасности (aDSM), что демонстрирует техническую реализуемость когортного фармаконадзора.

Weaknesses (Слабые стороны)

1. Хроническое недосообщение (under-reporting)

По оценкам экспертов ВОЗ, в странах с пассивным фармаконадзором регистрируется не более 5–10 % всех НЛР, а в странах с сопоставимым уровнем дохода – 2–7 %. Для Кыргызстана (население ≈ 7,2 млн) ожидаемое число НЛР в год 5–10 НЛР на 1000 пациентов, то есть 36 000 – 72 000 случаев. Фактическое число сообщений (порядка сотен в год) указывает на покрытие: менее 1 % реального объема НЛР.

2. Низкое качество сообщений

Значительная доля кейсов не содержит данных относительно:

- дозы,
- даты начала реакции,
- номера серии лекарственного препарата,
- списка сопутствующих препаратов.

Аналитическое следствие: 30–50 % сообщений непригодны для корректной оценки причинно-следственной связи.

3. Отсутствие интеграции в клинические информационные системы

Репортинг НЛР не встроен:

- в электронные истории болезни,
- системы назначения лекарств,
- аптечные базы отпуска.

Это увеличивает транзакционные издержки сообщения и снижает вероятность репортинга на 40–70 %.

4. Ограниченные кадровые и аналитические ресурсы

Уполномоченный орган располагает:

- недостаточным числом специалистов;
- отсутствием интеграции с другими информационными системами.

Система функционирует преимущественно в режиме «сбор без анализа».

5. Слабая вовлеченность пациентов

В развитых системах patient-reporting формирует 10–30 % сообщений, а в Кыргызстане эта доля близка к нулю.

Opportunities (Возможности)

1. Проведение обучающих тренингов по репортированию в системе фармаконадзора для врачей, фармацевтов, держателей регистрационных удостоверений и пациентов. Это может увеличить объем сообщений в 2–5 раз за 1–2 года и повысить полноту кейсов на 25–40 %.

2. Повышение качества периодических отчетов по безопасности ЛС (PSUR).

3. Развитие активного фармаконадзора. Вакцинация, биопрепараты, онкология и новые дженерики являются приоритетными сегментами для внедрения aDSM. Ожидаемый эффект: выявление сигналов безопасности в 3–6 раз быстрее по сравнению с пассивной системой.

Threats (Угрозы)

1. Рост доли дженериков и биоподобных препаратов

Повышает вариабельность качества, биодоступности и стабильности серий.

2. Нелегальный и параллельный импорт
Искажает сигналы безопасности и подрывает доверие населения.

3. Институциональная нестабильность

Смена приоритетов и руководства может прерывать начатые реформы и снижать преемственность политики.

Заключение

Система фармаконадзора в Кыргызской Республике обладает прочной институциональной и нормативной базой, международной интеграцией через Программу ВОЗ и демонстрирует положительную динамику развития. В стране внедрены цифровые инструменты мониторинга безопасности лекарственных средств и вакцин, функционирует мобильное приложение для репортирования, проводится активное обучение медицинских работников, а также реализуются механизмы ежедневного мониторинга ПППИ (Strengths).

В стране сохраняются проблемы недостаточного уровня репортирования о неже-

лательных реакциях, ограниченных кадровых и аналитических ресурсов, отсутствия интеграции фармаконадзора с клиническими информационными системами и низкой вовлеченности пациентов (Weaknesses).

Перспективными направлениями развития являются: цифровизация процессов фармаконадзора; расширение программ обучения по репортированию в системе фармаконадзора для врачей, фармацевтов, держателей регистрационных удостоверений и пациентов; развитие активного мониторинга безопасности и интеграция с системами прослеживаемости лекарственных средств. Реализация данных мер позволит повысить эффективность системы лекарственной безопасности и минимизировать риски фармакотерапии для населения.

Список литературы

1. Журавлева М. В., Романов Б. К., Городецкая Г. И., Муслимова О. В., Крысанова В. С., Демченкова Е. Ю. Актуальные вопросы безопасности лекарственных средств, возможности совершенствования системы фармаконадзора // Безопасность и риск фармакотерапии. 2019. Т. 7. № 3. С. 109–119. URL: <https://www.risksafety.ru/jour/article/view/153> (дата обращения: 01.06.2026). DOI: 10.30895/2312-7821-2019-7-3-109-119.
2. Шубникова Е. В. Пострегистрационный фармаконадзор: обзор открытых источников получения данных по безопасности лекарственных препаратов // Безопасность и риск фармакотерапии. 2024. Т. 12 (3). С. 309–330. DOI: 10.30895/2312-7821-2024-12-3-309-330.
3. Казаков А. С., Шубникова Е. В., Дармостукова М. А., Снегирева И. И., Кутехова Г. В., Затолочина К. Э., Вельц Н. Ю., Каперко Д. А., Олефир Ю. В. Международный мониторинг безопасности лекарственных средств // Безопасность и риск фармакотерапии. 2019. Т. 7. № 3. С. 120–126. URL: <https://www.risksafety.ru/jour/article/view/151> (дата обращения: 01.06.2026). DOI: 10.30895/2312-7821-2019-7-3-120-126.
4. Шубникова Е. В., Букатина Т. М., Каперко Д. А., Вельц Н. Ю., Дармостукова М. А., Казаков А. С., Снегирева И. И., Журавлева Е. О., Кутехова Г. В. Постмаркетинговые исследования безопасности лекарственных средств: анализ рекомендаций зарубежных регуляторных органов. Безопасность и риск фармакотерапии. 2018. № 6 (3). С. 130–137. DOI: 10.30895/2312-7821-2018-6-3-130-137.
5. Таубэ А. А. Безопасность применения лекарственных средств: методологические подходы к принятию мер по минимизации рисков // Вестник ВГУ. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2024. № 4. С. 125–135. URL: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/chembio/2024/04/2024-04-16.pdf> (дата обращения: 15.07.2026). DOI: 10.38096/1606-9919.2023.3.125-135.
6. De Pretis F., van Gils M., Forsberg M. M. A smart hospital-driven approach to precision pharmacovigilance // Trends in Pharmacological Sciences. 2022. Vol. 43. Is. 6. P. 473–481. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165614722000591> (дата обращения: 01.06.2026). DOI: 10.1016/j.tips.2022.03.009.
7. Pharmacovigilance / World Health Organization. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.who.int/teams/regulation-prequalification/regulation-and-safety/pharmacovigilance> (дата обращения: 15.05.2026).
8. Safety of medicines: a guide to detecting and reporting adverse drug reactions: why health professionals need to take action / World Health Organization. Geneva: World Health Organization, 2002. (WHO/EDM/QSM/2002.2). [Электронный ресурс]. URL: <https://iris.who.int/handle/10665/67378> (дата обращения: 22.05.2026).

9. Peters T., Soanes N., Abbas M., Ahmad J., Delumeau J. C., Herrero-Martinez E., Paramananda M., Piper J., Smail-Aoudia F., van der Spuij W., Veizovic T., Winstanley G. Effective Pharmacovigilance System Development: EFPIA-IPVG Consensus Recommendations // *Drug Safety*. 2021. Vol. 44. Is. 1. P. 17–28. DOI: 10.1007/s40264-020-01008-0.
10. Загородникова К. А. Организация мониторинга безопасности лекарственных средств в мире: методологические подходы // *Тихоокеанский медицинский журнал*. 2015. № 1. С. 11–15. URL: <https://medj.rucml.ru/journal/4e432d544d4a2d41525449434c452d323031352d302d312d302d31312d3135> (дата обращения: 01.06.2026).
11. Постановление Кабинета Министров Кыргызской Республики от 26 декабря 2024 г. № 802 «О внесении изменений в постановление Правительства Кыргызской Республики от 20 декабря 2018 года № 600 “О Программе Правительства Кыргызской Республики по охране здоровья населения и развитию системы здравоохранения на 2019–2030 годы «Здоровый человек – процветающая страна»» [Электронный ресурс]. URL: <https://koomtalkuu.gov.kg/ru/view-пра/3227> (дата обращения: 22.05.2026).
12. Ибрагимова Г. Я., Сатыбалдиев К. Ж., Исмаилов И. З., Ахметова Э. А., Муратолиева А. Д. Особенности обращения лекарственных средств и медицинских изделий в Кыргызской Республике // *Медицинский вестник Башкортостана*. 2024. Т. 19. № 1 (109). С. 49–53. EDN: HDSBFH.
13. Ermekova D., Ismailov I., Sabirova T., Muratalieva A., Kelgenbaeva Z. Pharmacoepidemiology of Using NSAID in Patients with Inflammatory Diseases of the Muscular System and Connective Tissue in Healthcare Settings // *Azerbaijan Medical Journal*. 2023. Vol. 63. Is. 10. P. 10745–10755. URL: <https://www.azerbaijanmedicaljournal.net/article/pharmacoepidemiology-of-using-nsaid-in-patients-with-inflammatory-diseases-of-the-muscular-system-and-connective-tissue-in-healthcare-settings> (дата обращения: 22.07.2026).
14. Джиенбекова Ч. М., Исмаилов И. З., Сабирова Т. С. Льготное лекарственное обеспечение населения Кыргызской Республики в рамках обязательного медицинского страхования // *Современные проблемы науки и образования*. 2023. № 3. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=32692> (дата обращения: 22.05.2026).
15. Garashi H. Y., Steinke D. T., Schafheutle E. I. A Systematic Review of Pharmacovigilance Systems in Developing Countries Using the WHO Pharmacovigilance Indicators // *Therapeutic Innovation & Regulatory Science*. 2022. Vol. 56. Is. 5. P. 717–743. DOI: 10.1007/s43441-022-00415-y. (дата обращения: 15.07.2026).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.



СВЯЗЬ УРОВНЕЙ БИОМАРКЕРОВ СИНОВИАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ СО СПЕКТРОМ ВОЗБУДИТЕЛЕЙ ПЕРИПРОТЕЗНОЙ ИНФЕКЦИИ СУСТАВОВ

Плиска Н. Н. ORCID ID 0000-0002-6060-8531

*Национальный научный центр травматологии и ортопедии имени академика Н. Д. Батпенова
Министерства здравоохранения Республики Казахстан, Астана, Республика Казахстан,
e-mail: Pliska6363@mail.ru*

Рост числа операций артропластики привел к увеличению частоты опасных перипротезных инфекций, лечение которых требует повторных хирургических вмешательств и сопряжено с высоким риском инвалидизации пациентов. Сложный этиопатогенез и растущая полирезистентность возбудителей инфекции требуют адаптации международных стандартов к региональной специфике и перехода к комплексному (микробиологическому и цитологическому) исследованию синовиальной жидкости для своевременного выбора хирургической тактики. Цель работы – проанализировать изменения этиологического профиля перипротезной инфекции крупных суставов и диагностические возможности цитологического мониторинга в специализированном стационаре. В ретроспективное исследование (2021–2025 гг.) включены 4324 биологических образца (синовиальная жидкость, аспират, биоптаты) от пациентов с подозрением на перипротезную инфекцию; цитологический мониторинг в 2025 г. был дополнен тестом на лейкоцитарную эстеразу. За 5 лет исследовано 230 образцов синовиальной жидкости, из которых в 71 случае (26,7 %) выявлен невоспалительный характер клеточного состава. В 159 случаях, что составляет 69,2 %, получены положительные результаты, которые доказывают наличие воспалительного процесса в суставе. Превышение порогового уровня лейкоцитарной эстеразы (более 25 ед.) абсолютно коррелирует с бактериологической верификацией наличием патогенной микрофлоры в очаге поражения. При микробиологическом исследовании среднегодовой уровень верификации отрицательных результатов за весь период достиг 31,8 %. Всего изолировано 2937 штаммов патогенов, среди которых на протяжении всего периода доминировали *Staphylococcus spp.* (64,4 % общего числа). Между *Staphylococcus aureus* и коагулазонегативными стафилококками отмечалось межвидовое конкурирование от 20 до 42 %, что полностью согласуется с данными международных профильных исследований. Оценка цитоза и эстеразы синовиальной жидкости быстро подтверждает инфекцию для начала антибиотикотерапии. Отрицательные результаты цитологии (26,7 %) и микробиологии (31,8 %) надежно исключают инфекцию, подтверждая асептическое расшатывание.

Ключевые слова: перипротезная инфекция, синовиальные биомаркеры, микробиологическая верификация

THE RELATIONSHIP BETWEEN SYNOVIAL FLUID BIOMARKER LEVELS AND THE SPECTRUM OF CAUSATIVE AGENTS IN PERIPROSTHETIC JOINT INFECTION

Pliska N. N. ORCID ID 0000-0002-6060-8531

*National Scientific Center of Traumatology and Orthopedics named after N. D. Batpenov
of the Ministry of Healthcare of the Republic of Kazakhstan, Astana, Republic of Kazakhstan,
e-mail: Pliska6363@mail.ru*

The increase in the number of arthroplasty procedures has led to a higher incidence of dangerous periprosthetic joint infections. Their treatment requires repeated surgical interventions and carries a high risk of patient disability. The complex etiopathogenesis and growing multidrug resistance of pathogens require the adaptation of international standards to regional specifics. They also necessitate a transition to a comprehensive (microbiological and cytological) examination of synovial fluid for the timely selection of surgical tactics. The aim of the study is to analyze changes in the etiological profile of periprosthetic joint infections of major joints and the diagnostic capabilities of cytological monitoring in a specialized hospital. A retrospective study (2021–2025) included 4,324 biological samples (synovial fluid, aspirate, biopsies) from patients with suspected periprosthetic joint infection. In 2025, cytological monitoring was supplemented with a leukocyte esterase test. Over the five-year period, 230 synovial fluid samples were examined. In 71 cases (26,7 %), a non-inflammatory cellular composition was revealed. In 159 cases (69.2 %), positive results were obtained, proving the presence of an inflammatory process in the joint. An excess of the leukocyte esterase threshold level above 25 units absolutely correlates with bacteriological verification of the presence of pathogenic microflora in the lesion site. In microbiological examination, the average annual verification rate of negative results over the entire period reached 31.8 %. A total of 2,937 pathogen strains were isolated, among which *Staphylococcus spp.* dominated throughout the entire period (64.4 % of the total number). Interspecific competition between *Staphylococcus aureus* and coagulase-negative staphylococci ranged from 20 % to 42 %, which is in full agreement with data from international profile studies. Evaluation of synovial fluid cytosis and esterase quickly confirms infection to initiate antibiotic therapy. Negative cytology (26.7 %) and microbiology (31.8 %) results reliably exclude infection, confirming aseptic loosening.

Keywords: periprosthetic joint infection, synovial biomarkers, microbiological verification

Введение

Старение населения и расширение показаний к артропластике привели к росту числа операций тотального эндопротезирования. Обратной стороной этой тенденции стало увеличение частоты инфекционных осложнений, среди которых наиболее опасной остается перипротезная инфекция (ППИ). Борьба с ППИ требует длительного многоэтапного лечения и повторных хирургических вмешательств. Высокая медицинская значимость патологии связана с риском стойкой инвалидизации и резким снижением качества жизни пациентов. Кроме того, длительное пребывание в стационаре, применение дорогостоящих антибиотиков и высокая частота рецидивов создают колоссальную финансовую нагрузку на здравоохранение. В условиях растущего объема хирургической помощи, особенно при дефиците ресурсов, затраты на лечение таких осложнений возрастают многократно. Это превращает ППИ в комплексную проблему, требующую междисциплинарного подхода в клиническом, эпидемиологическом и экономическом аспектах [1]. Рост частоты перипротезной инфекции на фоне увеличения объемов эндопротезирования требует модернизации подходов к диагностике, терапии и контролю лекарственной устойчивости микроорганизмов. Крупные клинические исследования показывают, что лечение таких осложнений остается крайне неэффективным в значительном проценте случаев. Авторы указывают на необходимость пересмотра стандартных протоколов с учетом региональных экономических факторов и доступности локального лекарственного обеспечения [2].

Экономический анализ в ряде стран Европы показал, что перипротезная инфекция оборачивается огромными финансовыми потерями даже для высокотехнологичной медицины [3]. Это подтверждает, что вложения в профилактику экономически выгоднее, чем оплата последующего хирургического лечения [4]. При этом в регионах с дефицитом ресурсов терапия осложнений затрудняется нехваткой специализированных клиник и таргетных антибиотиков. Как следствие, инфекция переходит в хроническую форму, что резко снижает эффективность повторных операций [5].

Скрининг групп риска остается первоочередной задачей, несмотря на развитие ревизионной хирургии. Ключевыми факторами риска при артропластике коленного сустава являются ожирение, сахарный диабет и тяжелый соматический статус [6, 7]. Наличие декомпенсированных сопутствующих заболеваний, таких как терминальная

почечная недостаточность, значительно усложняет лечение инфекции. Для верификации диагноза рекомендуется применять современный трехуровневый алгоритм EBJIS, который стандартизирует междисциплинарный подход и оптимизирует лечебно-диагностический процесс. Однако полноценная интеграция протокола в широкую практику часто лимитирована возможностями региональных лабораторий и дефицитом методов высокоточной визуализации [8, 9].

Сложный этиопатогенез ППИ и изменчивость микробного пейзажа затрудняют выбор первичных антибиотиков. Сегодня доминируют грамположительные патогены, а число полирезистентных штаммов растет, подрывая эффективность классических протоколов [10]. Многолетний мониторинг четко подтверждает падение чувствительности бактерий к базовым препаратам. Несмотря на обилие мировых публикаций, адаптация международных стандартов с учетом региональной специфики флоры остается острой проблемой [11].

Ограничения стандартных бактериологических тестов на фоне растущей резистентности и изменчивости флоры требуют внедрения более гибких диагностических платформ. Ключевым шагом в этом направлении становится переход от исключительно микробиологического мониторинга к комплексному исследованию синовиальной жидкости. Симультанное использование микробиологических и цитологических методов позволяет не только выявить патоген, но и получить быструю патоморфологическую оценку воспаления, что критически важно для своевременного выбора хирургической тактики [12, 13].

Цель исследования – провести мониторинг спектра возбудителей перипротезной инфекции крупных суставов и оценить диагностическую значимость цитологических маркеров синовиальной жидкости при различных вариантах бактериальной верификации.

В соответствии с поставленной целью в работе решались следующие задачи:

1. Провести сравнительный анализ динамики распределения патогенов в этиологической структуре ППИ за пятилетний период.
2. Оценить распространенность перипротезной инфекции в когорте пациентов, прошедших симультанное (параллельное) микробиологическое и цитологическое исследование синовиальной жидкости.
3. Выявить закономерности и математические корреляции между степенью выраженности клеточного цитоза, полуколичественными показателями экспресс-теста на лейкоцитарную эстеразу и вероятностью

верификации специфических микроорганизмов на основе их пороговых значений между нормой и патологией.

Заключение по результатам собственного исследования для анализа динамики патогенов, сопоставления диагностических порогов цитологических показателей синовиальной жидкости и экспресс-оценки лейкоцитарной эстеразы имеет хорошую прогностическую ценность; параллельное использование этих методов позволяет достоверно исключить или подтвердить инфекцию еще до получения результатов многодневного бактериологического посева, описанных в современной научной литературе.

Материалы и методы исследования

В одноцентровое ретроспективное исследование (2021–2025 гг., ННЦТО им. акад. Н. Д. Батпенова, Астана) включено 4324 биологических образца от пациентов с подозрением на перипротезную инфекцию. Все пациенты ранее перенесли неэффективное лечение в регионах Казахстана и госпитализированы в отделение осложненной травмы. От каждого больного получено от одного до четырех образцов: до- и интраоперационная синовиальная жидкость, аспират, а также ткани, извлеченные при ревизии суставов – биоптаты. Цитологическое исследование синовиальной жидкости, динамика количества клеток и клеточного состава дополнены в 2025 г. исследованием на лейкоцитарную эстеразу.

Цитологическое исследование

За 2021–2025 гг. было исследовано синовиальной жидкости 230 случаев, при этом получен 71 случай отрицательных или нега-

тивных результатов, что составляет 30,8 % от общего количества всех проведенных исследований, соответствующих невоспалительному характеру изменения клеточного состава: количества лейкоцитов, нейтрофилов, лимфоцитов и (в 2025 г.) лейкоцитарной эстеразы. В 159 случаях, что составляет 69,2 %, получены положительные результаты, которые доказывают наличие воспалительного процесса в суставе. В 2021 г. было проведено 16 исследований, из них 4 результата было негативных и 12 положительных; в 2022 г. исследований было 27, из них 5 результатов было негативных и 22 положительных; в 2023 г. исследований было 40, из них 11 результатов было негативных и 29 положительных, в 2024 г. 63 исследования, из них 45 положительных и 18 отрицательных результатов, в 2025 г. 84 образца исследовано, в 51 случае результаты положительные. Во всех пробах синовиальной жидкости были изучены следующие показатели: мутность, количество клеток – лейкоцитов, нейтрофилов, лимфоцитов; по их изменению был выставлен результат: положительный либо отрицательный. Критерием оценки служил уровень цитоза. Показатель выше 200 клеток/мкл расценивали как сомнительный результат, свидетельствующий о наличии воспалительного процесса, но не о перипротезной инфекции [14]. Диапазон значений от 2000 до 3000 клеток/мкл классифицировали как сомнительный (пограничный) результат. Уровень цитоза 3000 клеток/мкл и более интерпретировали как признак перипротезной инфекции.

Процентное соотношение негативных и позитивных исследований за период с 2021 по 2025 г. представлено на рис. 1.

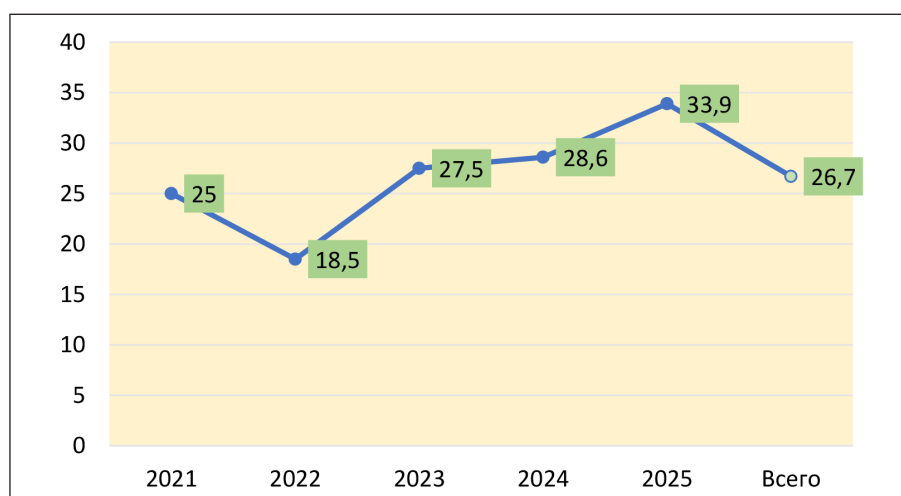


Рис. 1. Динамика процентного соотношения отрицательных результатов цитологического исследования синовиальной жидкости 2021–2025 гг.

Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Истинные результаты положительно-го цитологического исследования были зафиксированы свыше 3000 клеток/мкл – 98 000 клеток/мкл, и также единичные случаи, сплошь покрывающие поля, их было 41–48 % за 5 лет исследований. При этом цитологическое исследование в 2025 г. было дополнено определением лейкоцитарной эстеразы. Определение лейкоцитарной эстеразы выполнялось полуколичественным методом с помощью стандартных диагностических тест-полосок для оценки активности фермента в неразведенной синовиальной жидкости, положительным считается результат при колориметрическом изменении тест-полоски от «+» до «++» (соответствует уровню > 500 лейкоцитов в 1 мкл синовиальной жидкости) в течение 5–10 мин. Диагностика лейкоцитарной эстеразы (ЛЕ) определена в 48 (57,1 %) случаях (разброс полученных результатов от 2,5 до 500 ед.) [15, 16]. Параллельно проведен бактериологический посев образцов в 33 случаях. Проведенный анализ верифицировал высокую прогностическую ценность определения уровня ЛЕ в синовиальной жидкости как экспресс-маркера синовиальной инфекционной этиологии. Пороговые значения и верификация инфекции: установлено, что превышение порогового уровня ЛЕ – более 25 ед. – демонстрирует статистически корреляционную связь с верифицированным бактериологическим наличием патогенной микрофлоры в очаге поражения.

Анализ этиологической структуры инфекционного процесса выявил прямую зависимость интенсивности ферментативного ответа (ЛЕ) от тинкториальных свойств верифицированных возбудителей:

1) *грамположительная микрофлора (Staphylococcus. spp.)* ассоциирована с вы-

раженной манифестацией активности лейкоцитарной эстеразы (ЛЕ), достигающей пиковых значений (до 500 ед.);

2) *грамотрицательные патогены (порядок (Enterobacteriales)* индуцируют стертый локальный воспалительный ответ, что характеризуется фиксацией показателей ЛЕ на субпороговом и пограничном уровнях (15–25 ед.).

Микробиологическое исследование

За анализируемый период микробиологическому исследованию подверглись 4324 доставленных образца. Распределение отрицательных результатов характеризовалось межгодовой вариабельностью: в 2021 г. отсутствие роста зарегистрировано в 187 пробах (39,2 %), в 2022 г. – в 173 (34,6 %), в 2023 г. – в 223 (34,2 %), в 2024 г. – в 197 (21,7 %), а в 2025 г. – в 407 (29,4 %). Среднегодовой уровень верификации отрицательных результатов за весь период достиг 31,8 %. Визуализированная динамика указанных колебаний подробно представлена на рис. 2.

За 2021–2025 гг. в рамках микробиологического мониторинга перипротезной инфекции крупных суставов было изолировано 2937 штаммов патогенов, колебания микрофлоры указаны в таблице. Доминирующими возбудителями на протяжении всего наблюдения оставались *Staphylococcus spp.*, составившие 64,4 % (1881 изолят) от общего числа находок. При этом зафиксированы колебания их удельного веса в этиологической структуре по годам. Между *Staphylococcus aureus* (887 изолятов) и коагулазонегативными (условно-патогенными) стафилококками (1004 изолята) отмечалось выраженное межвидовое конкурентное взаимодействие.

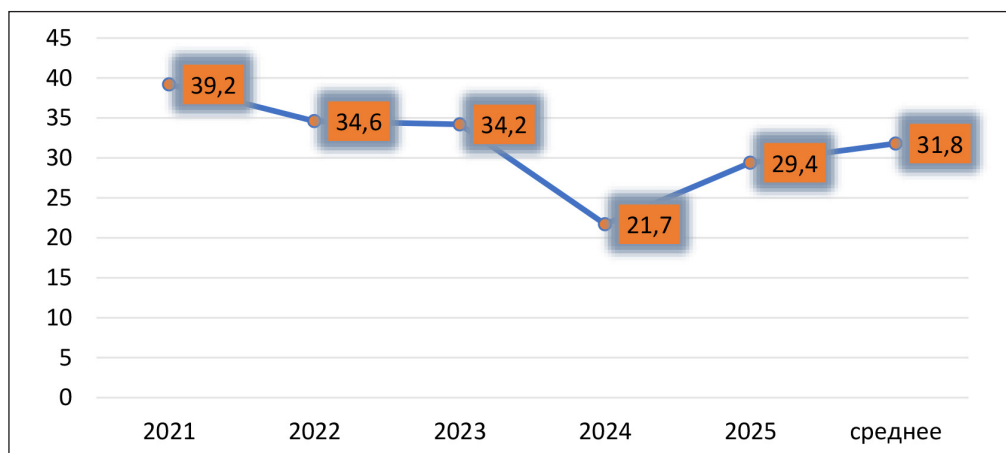


Рис. 2. Динамика отрицательных микробиологических результатов при перипротезной инфекции 2021–2025 гг.

Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Эволюция микробного пейзажа и отдельных штаммов патогенов, верифицированных при перипротезной инфекции за 2021–2025 гг.

Микроорганизмы	2021 г.		2022 г.		2023 г.		2024 г.		2025 г.		Всего за 5 лет	
	абс.	% и CI	абс.	% и CI	абс.	% и CI	абс.	% и CI	абс.	% и CI	среднее абс.	% и CI
Staphylococcus aureus	98	27,8	110	32,3	158	32,7	214	34,4	307	27,1	887	30,2
		[23,1–32,4]		[27,5 %-37,4 %]		[28,7 %-37,0 %]		[30,7 %-38,2 %]		[24,6 %-29,7 %]		[28,6 %-31,9 %]
Staphylococcus spp.	147	41,7	128	37,5	162	33,5	186	30	381	33,6	1004	34,1
		[36,3 %-46,5 %]		[32,6 %-42,8 %]		[29,5 %-37,9 %]		[26,4 %-33,6 %]		[30,9 %-36,4 %]		[32,5 %-35,9 %]
НГОБ	5	1,4	19	5,6	5	1,1	12	1,9	13	1,1	54	1,8
		[0,6 %-3,2 %]		[3,6 %-8,5 %]		[0,4 %-2,4 %]		[1,1 %-3,3 %]		[0,7 %-2,0 %]		[1,4 %-2,4 %]
Pseudomonas aeruginosa	32	8,9	39	11,4	63	13,1	97	15,6	162	14,3	393	13,4
		[6,4 %-12,4 %]		[8,5 %-15,3 %]		[10,3 %-16,3 %]		[12,9 %-18,6 %]		[12,4 %-16,4 %]		[12,2 %-14,7 %]
Enterobacteriales	49	14	27	7,9	78	16,1	67	10,7	123	10,8	344	11,8
		[10,6 %-17,7 %]		[5,5 %-11,3 %]		[13,1 %-19,7 %]		[8,6 %-13,4 %]		[9,2 %-12,8 %]		[10,6 %-12,9 %]
Др. микроорганизмы	25	7,1	18	5,3	16	3,5	46	7,4	143	12,6	248	8,5
		[4,8 %-10,2 %]		[3,4 %-8,2 %]		[2,0 %-5,3 %]		[5,6 %-9,7 %]		[10,8 %-14,7 %]		[7,5 %-9,5 %]
Анаэробы	0		0		1	0,2	1	0,1	5	0,5	7	0,2
Итого		356		341		483		623		1134		2937

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

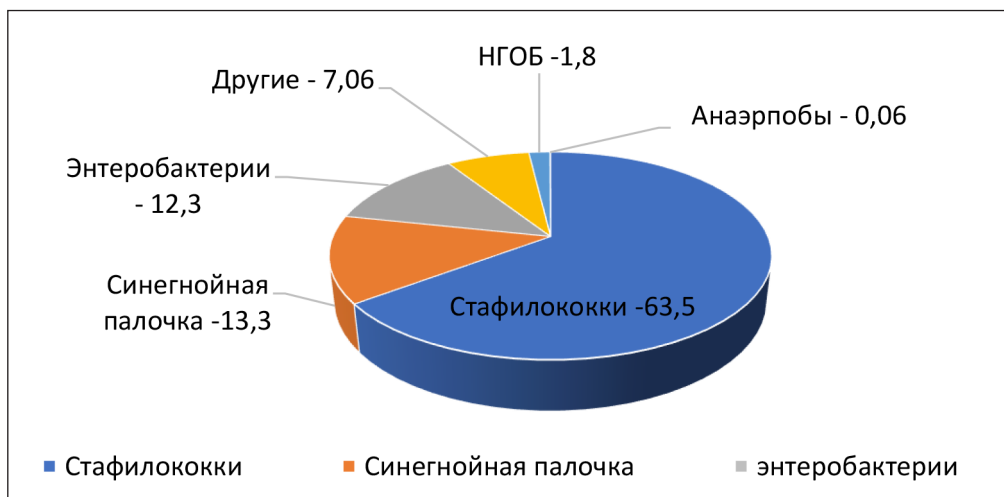


Рис. 3. Общее количество выделенных микроорганизмов при перипротезной инфекции в динамике 2021–2025 г.
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

На протяжении периода наблюдения удельный вес золотистого стафилококка демонстрировал колебания в диапазоне от 20 до 32,7 %. В свою очередь, доля условно-патогенных представителей рода снизилась с исходных 42 % до своего минимального значения в 30 %.

Доверительных интервалов долей (95 % CI) в виде процентного соотношения отдельных видов микроорганизмов к их общему числу, с расчетом 95 % для оценки точности полученных результатов

Вторым по значимости патогеном оказалась синегнойная палочка (*Pseudomonas aeruginosa*) с долей 13,4 % (393 изолята). При анализе динамики выявления синегнойной палочки при перипротезной инфекции зафиксированы колебания показателей от минимального уровня в 8,9 % до максимального значения, равного 15,6 %.

Далее следовала группа *Enterobacteriales*, обнаруженная в 344 изолята (11,8 %). Частота верификации представителей порядка *Enterobacteriales* характеризовалась выраженной динамикой: минимальный уровень детекции составил 7,9 %, в то время как пиковое значение достигало 16,1 %.

Другие микроорганизмы, среди которых встречались *Enterococcus spp.*, *Streptococcus spp.* и *Candida spp.*, были выделены в 248 случаях (8,5 %). Доля верификации данной группы микроорганизмов на протяжении пятилетнего периода мониторинга демонстрировала вариабельность в диапазоне от 3,5 до 12,6 %.

Частота обнаружения анаэробов за 5 лет оказалась минимальной – всего 7 штаммов

(0,2 %). В первые 2 года мониторинга анаэробная флора в исследуемых пробах не выявлялась, тогда как в последующие 3 года отмечались лишь единичные случаи.

На рис. 3 отражены усредненные за пятилетний период показатели структуры микробного пейзажа основных возбудителей перипротезной инфекции. Доминирующее положение бактерий рода *Staphylococcus* полностью согласуется с результатами многочисленных международных исследований.

Выводы

Динамика и структура цитоза: За 2021–2025 гг. объем предоперационных исследований синовиальной жидкости вырос более чем в 5 раз (с 16 до 84; всего (n = 230)). Воспалительный профиль (цитоз > 200 клеток/мкл) подтвержден в 69,2 % случаев (159 образцов), невоспалительный – в 30,8 % (71 образец). При этом в 41–48 % от общего числа исследований верифицированы истинные признаки перипротезной инфекции (цитоз от 3000 до 98 000 клеток/мкл или лейкоциты сплошь).

Диагностическая ценность ЛЕ: Внедренное в 2025 г. определение лейкоцитарной эстеразы (ЛЕ) выполнено в 48 случаях (57,1 % образцов за год) с диапазоном значений от 2,5 до 500 ед. Уровень ЛЕ > 25 ед. позволяет с высокой долей вероятности диагностировать как положительный результат, при этом проводя параллельный бактериологический посев (n = 33), подтвердив статус высокоточного экспресс-маркера инфекционного синовита.

Этиологические особенности: Интенсивность ферментативного ответа (ЛЕ) напрямую зависит от типа возбудителя. Грамположительная микрофлора (*Staphylococcus spp.*) ассоциирована с пиковой активностью ЛЕ (до 500 ед.), тогда как грамотрицательные патогены (*Enterobacteriales*) индуцируют стертый ответ на пограничном уровне (15–25 ед.).

Микробиологический мониторинг (n = 4324): Среднегодовой уровень отрицательных результатов посевов составил 31,8 %. Из 2937 изолированных штаммов патогенов абсолютно доминировали *Staphylococcus spp.* (64,4 %). Отмечена межвидовая конкуренция: доля *St. aureus* колебалась в пределах 20–32,7 %, а удельный вес коагулазонегативных стафилококков снизился с 42 до 30 %. **Грамотрицательные патогены:** Вторым по значимости возбудителем ППИ признана *Pseudomonas aeruginosa* с долей 13,4 % (393 изолята; колебания по годам 8,9–15,6 %). Доля представителей порядка *Enterobacteriales* составила 11,7 % (344 пробы; колебания 7,9–16,1 %). **Редкие и микст-инфекции:** Группа прочих микроорганизмов (*Enterococcus spp.*, *Streptococcus spp.*, *Candida spp.*) составила 8,44 % (248 случаев; вариабельность 3,5–12,6 %). Минимальная частота выявления зафиксирована у анаэробов – всего 0,2 % (7 штаммов), регистрировавшихся исключительно в последние 3 года мониторинга.

Соответствие мировым тенденциям: 5-летняя структура микробного пейзажа с абсолютным доминированием *Staphylococcus spp.* полностью согласуется с данными международных профильных исследований.

Заключение

Практическое значение работы заключается в одноцентровой оценке эффективности дополненного протокола диагностики перипротезной инфекции. Применение комбинации экспресс-теста на лейкоцитарную эстеразу и оценки уровня цитоэстеразы синовиальной жидкости в исследованной когорте пациентов ускорило возможность выявления инфекционного процесса на этапе первичного осмотра и пункции сустава. Выявленная в ходе анализа корреляция между ферментативной активностью и тинкториальными свойствами выделенных микроорганизмов указывает на потенциальную возможность предварительного этиологического скрининга до получения результатов бактериологического исследования. Такой подход обеспечил своевременное начало эмпирической антибиотикотерапии и выбор хирургической тактики с последующей коррекцией

лечения на основании локального мониторинга антибиотикорезистентности.

Ретроспективные данные продемонстрировали сопоставимую частоту отрицательных результатов при цитологическом анализе синовиальной жидкости (26,7 %) и микробиологическом исследовании (31,8 %), стабильно удерживавшуюся в исследуемый период на уровне около 30 %. Отсутствие лабораторных маркеров воспаления и микробного роста в трети образцов, изученных на базе ННЦТО им. акад. Н. Д. Батпенова (г. Астана), расценивалось как важный критерий дифференциальной диагностики. Это позволило у данной группы пациентов обоснованно дифференцировать асептическую природу несостоятельности эндопротеза от перипротезной инфекции.

Список литературы

1. Божкова С. А., Тихилов Р. М., Артюх В. А. Перипротезная инфекция суставов как социально-экономическая проблема современной ортопедии // Вестник Российской академии медицинских наук. 2023. Т. 78 (6). С. 601–608. DOI: 10.15690/vramn8370.
2. Глазков И. Р. Современный взгляд на перипротезную инфекцию после эндопротезирования тазобедренного сустава: факторы риска, диагностика и алгоритмы лечения // Современные проблемы науки и образования. 2026. № 4. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=34584> (дата обращения: 04.07.2026). DOI: 10.17513/spno.34584.
3. Kandler N., Al-Mouazzen L., Simpson A. H. R. W., Alt V., Szymiski D., Rupp M. The health-economic burden of hip and knee periprosthetic joint infections in Europe: a comprehensive analysis following primary arthroplasty // Bone & Joint Open. 2025. Vol. 107-B (4). DOI: 10.1302/2633-1462.63.BJO-2024-0225.R1.
4. Siddiqi A., Kunze K. N., Yayac M., Piuze N. S., Higuera-Rueda C. A., Parvizi J., The Cost-Effectiveness of Extended Oral Antibiotic Prophylaxis Following Total Joint Arthroplasty // The Journal of Arthroplasty. 2022. Vol. 37 (10). P. 1910–1915. DOI: 10.1016/j.arth.2022.04.027.
5. Корыткин А. А., Новикова Я. С., Морозова Е. А., Ефимов Н. Н., Стафеев Д. В., Ласунский С. А., Машков В. М. Структура перипротезной инфекции в Российской Федерации: многоцентровое исследование // Травматология и ортопедия России. 2022. Т. 28 (4). С. 9–21. DOI: 10.21823/2311-2905-2022-28-4-9-21.
6. Wong J., Chopra S., Hall A. J., Abugo G. U., Mahmood F., Wallace D., Holloway N. J., Clarke J. V. Factors associated with periprosthetic joint infection following lower limb arthroplasty: a single-centre, registry-linked cohort study of 30,102 cases // The Bone & Joint Journal. 2026. Vol. 108. B (4). P. 450–458. DOI: 10.1302/0301-620X.108B4.BJJ-2024-1347.R2.
7. Kunutsor S. K., Barrett M. C., Whitehouse M. R., Blom A. W. Risk factors for periprosthetic joint infection following primary total joint arthroplasty: a systematic review and meta-analysis of 24 cohort studies // Journal of Global Antimicrobial Resistance. 2021. Vol. 24. P. 338–347. DOI: 10.1016/j.jgar.2020.12.016.
8. Артюх В. А., Божкова С. А., Кочиш А. А., Разоренова В. Л., Ливенцова В. Н. Трудности и ограничения применения современных диагностических критериев перипротезной инфекции в клинической практике // Травматология и ортопедия России. 2023. Т. 29 (2). С. 45–56. DOI: 10.21823/2311-2905-2023-29-2-45-56.

9. Saadana J., Abdeljelil M., Khemili. K., Chaouch F., Saad L., Belgacem H., Jellali M., Fekih A., Toumi A., Aloui I., Abid A. Strategies for periprosthetic joint infection management in resource-limited settings: the applicability of EBJIS criteria // *Journal of Bone and Joint Infection*. 2025. Vol. 49 (1). P. 35–42. DOI: 10.1007/s00264-025-06478-4.
10. Roman M., Costache M., Popa M. I. Microbiological Profiles, Antibiotic Susceptibility Patterns and Drug Resistance Trends in Periprosthetic Joint Infections // *Microorganisms*. 2025. Vol. 13 (5). Art.1168. DOI: 10.3390/microorganisms13051168.
11. Wang L., Zhang Y., Li X. Comprehensive analysis of the pathogen spectrum and antibiotic resistance in periprosthetic joint infection: why regional variations matter for empirical therapy // *Frontiers in Surgery*. 2025. Vol. 12. Art. 1566689. DOI: 10.3389/fsurg.2025.1566689.
12. Sigmund I. K., Friesenbichler J., Sevelde F., Staats K., Maurer-Ertl W., Leithne A., Windhager R. Multiplex PCR and synovial fluid biomarkers as a combined diagnostic platform for rapid detection of periprosthetic joint infection // *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume*. 2024. Vol. 106 (14). P. 1245–1254. DOI: 10.2106/JBJS.23.00890.
13. Parvizi J., Tan T. L., Goswami K., Higuera C., Valle C. D., Chen A. F., Shohat N. The New Definition of Periprosthetic Joint Infection: From the Workgroup of the Musculoskeletal Infection Society // *The Journal of Arthroplasty*. 2018. Vol. 33 (5). P. 1309–1314. DOI: 10.1016/j.arth.2018.02.078.
14. Тихилов Р. М., Шаповалов В. М., Плиев Д. Г., Божкова С. А., Артюх В. А. Классификация и алгоритм диагностики и лечения перипротезной инфекции тазобедренного сустава // *Травматология и ортопедия России*. 2016. Т. 22 (1). С. 33–45. DOI: 10.21823/2311-2905-2016-0-1-33-45.
15. Материалы Второй международной согласительной конференции по скелетно-мышечной инфекции / под общ. ред. Тихилов Р. М., Божкова С. А., Шубняков И. И. СПб.: РНИИТО им. Р. Р. Вредена, 2019. 314 с. ISBN 978-5-6040358-0-1.
16. Пантелеев А. Н., Божкова С. А., Преображенский П. М., Каземирский А. В. Возможности выявления латентной перипротезной инфекции при ревизионном эндопротезировании коленного сустава // *Гений ортопедии*. 2021. Т. 27 (5). С. 562–569. DOI: 10.18019/1028-4427-2021-27-5-562-569.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 612.018:612.133:612.67



CC BY 4.0

**РОЛЬ РЕЦЕПТОРОВ ЭСТРОГЕНОВ В ПРОЦЕССАХ
ВОЗРАСТНЫХ АРТЕРИАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ**

**Зинеби Иршад ORCID ID 0009-0008-5724-5902,
Бажи Аюб ORCID ID 0009-0002-4605-5544,
Максимюк Н. Н. ORCID ID 0000-0001-6634-7638,
Хусейнаева Ф. Д. ORCID ID 0009-0000-5384-1049**

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого»,
Великий Новгород, Российская Федерация, e-mail: nnm93@yandex.ru*

Сердечно-сосудистые заболевания остаются ведущей причиной смертности среди женщин, при этом после наступления менопаузы их распространенность существенно возрастает. Одним из ключевых механизмов возрастного повышения сердечно-сосудистого риска считается нарушение эстрогеновой сигнализации, обусловленное не только снижением уровня эстрогенов, но и изменениями экспрессии и функциональной активности их рецепторов. Целью настоящего обзора, составленного на основании анализа 31 научной публикации, явилось обобщение современных отечественных и зарубежных исследований роли рецепторов эстрогенов ER α , ER β и GPER в механизмах сосудистого старения. Современные представления рассматривают сосудистое старение как многофакторный процесс, включающий эндотелиальную дисфункцию, хроническое низкоинтенсивное воспаление (inflammaging), оксидативный стресс, митохондриальную дисфункцию, эпигенетические изменения и накопление сенесцентных клеток. Совокупность этих нарушений приводит к снижению эластичности сосудистой стенки, ухудшению вазомоторной функции и повышению риска сердечно-сосудистых осложнений. Проведен анализ современных экспериментальных и клинических исследований, посвященных участию рецепторов эстрогенов в регуляции эндотелиальной функции, сосудистого тонуса, воспалительных процессов, оксидативного стресса и сосудистого ремоделирования. Рассмотрены возрастные изменения рецепторной системы, их значение для развития сосудистой дисфункции, а также современные представления о клиническом применении менопаузальной гормональной терапии и перспективных рецептор-ориентированных подходах. Показано, что нарушение функционирования рецепторов ER α , ER β и GPER является важным патогенетическим механизмом сосудистого старения и может рассматриваться как перспективная терапевтическая мишень для профилактики возраст-ассоциированных сердечно-сосудистых заболеваний.

Ключевые слова: рецепторы эстрогенов, ER α , ER β , GPER, сосудистое старение, эндотелиальная дисфункция, менопауза, менопаузальная гормональная терапия

Благодарности: авторы выражают искреннюю благодарность научному руководителю медицинского института НовГУ имени Ярослава Мудрого, академику РАН, доктору медицинских наук, профессору Веберу Виктору Робертовичу.

**THE ROLE OF ESTROGEN RECEPTORS
IN AGING-RELATED ARTERIAL CHANGES**

**Zinebi Irshad ORCID ID 0009-0008-5724-5902,
Bajji Ayoub ORCID ID 0009-0002-4605-5544,
Maksimiyuk N. N. ORCID ID 0000-0001-6634-7638,
Khuseynaeva F. D. ORCID ID 0009-0000-5484-1049**

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Novgorod State University named after Yaroslav-the-Wise”,
Veliky Novgorod, Russian Federation, e-mail: nnm93@yandex.ru*

Cardiovascular diseases remain the leading cause of mortality among women, with their incidence increasing significantly after menopause. One of the key mechanisms underlying the age-related increase in cardiovascular risk is impaired estrogen signaling, which is associated not only with declining estrogen levels but also with changes in the expression and functional activity of estrogen receptors. The present review, based on the analysis of 31 scientific publications, summarizes current Russian and international evidence on the role of estrogen receptors ER α , ER β , and GPER in the mechanisms of vascular aging. Current concepts describe vascular aging as a multifactorial process involving endothelial dysfunction, chronic low-grade inflammation (inflammaging), oxidative stress, mitochondrial dysfunction, epigenetic alterations, and the accumulation of senescent cells. Together, these changes contribute to reduced arterial elasticity, impaired vasomotor function, and an increased risk of cardiovascular complications. Current experimental and clinical studies addressing the involvement of estrogen receptors in the regulation of endothelial function, vascular tone, inflammatory processes, oxidative stress, and vascular remodeling are reviewed. Age-related alterations in the receptor system, their contribution to vascular dysfunction, and current perspectives on menopausal hormone therapy and receptor-targeted therapeutic strategies are also discussed. Available evidence indicates that impaired ER α , ER β , and GPER signaling represents an important pathogenic mechanism of vascular aging and may serve as a promising therapeutic target for the prevention of age-related cardiovascular diseases.

Keywords: estrogen receptors, ER α , ER β , GPER, vascular aging, endothelial dysfunction, menopause, menopausal hormone therapy

Acknowledgements: The authors express their sincere gratitude to Viktor Robertovich Weber, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of the Medical Institute at Yaroslav the Wise Novgorod State University.

Введение

Сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) продолжают занимать первое место среди причин смертности во всем мире и остаются одной из наиболее актуальных медико-социальных проблем современного здравоохранения. Несмотря на более низкий риск развития сердечно-сосудистой патологии у женщин репродуктивного возраста по сравнению с мужчинами, после наступления менопаузы частота артериальной гипертензии, атеросклероза, ишемической болезни сердца и хронической сердечной недостаточности существенно возрастает [1–3]. Аналогичная эпидемиологическая ситуация наблюдается и в Российской Федерации, где ССЗ остаются ведущей причиной смертности, а артериальная гипертензия рассматривается как один из основных модифицируемых факторов сердечно-сосудистого риска [4].

Установлено, что относительно низкая распространенность сердечно-сосудистых заболеваний у женщин до менопаузы во многом связана с защитным действием эндогенных эстрогенов, главным образом 17 β -эстрадиола [5]. Помимо регуляции репродуктивной функции, эстрогены участвуют в поддержании сосудистого гомеостаза, стимулируя синтез оксида азота, уменьшая выраженность оксидативного стресса и воспалительных реакций, а также регулируя сосудистый тонус и процессы ремоделирования сосудистой стенки [6–8]. После прекращения функции яичников снижение концентрации эстрогенов сопровождается развитием эндотелиальной дисфункции, увеличением артериальной жесткости и ускорением процессов сосудистого старения [9].

Большинство сосудистых эффектов эстрогенов реализуется через рецепторы ER α , ER β и мембранный G-белок-связанный рецептор GPER. Их активация обеспечивает стимуляцию синтеза оксида азота, ограничение воспалительных реакций, подавление патологического сосудистого ремоделирования и ускорение репарации эндотелия. Вместе с тем показано, что старение сопровождается изменением экспрессии и функциональной активности рецепторов эстрогенов, нарушением внутриклеточной передачи сигнала и снижением чувствительности сосудистой стенки к действию эстрогенов, что может способствовать снижению чувствительности сосудистой стенки к действию эстрогенов и рассматриваться как один из возможных факторов, влияющих на сосудистые эффекты МГТ при ее позднем назначении [6, 10, 11].

Несмотря на значительный прогресс в изучении молекулярных механизмов со-

судистого старения, роль различных типов рецепторов эстрогенов в развитии сосудистого старения остается изученной не полностью [12]. Это определяет актуальность анализа современных экспериментальных и клинических исследований, посвященных механизмам эстрогеновой сигнализации, возрастным изменениям рецепторной системы и их возможному значению для разработки новых подходов к ведению женщин в постменопаузе [13–15].

Цель исследования – анализ современных отечественных и зарубежных публикаций, посвященных роли рецепторов эстрогенов в механизмах сосудистого старения, обобщение результатов экспериментальных и клинических исследований, касающихся возрастных изменений их экспрессии и функциональной активности, а также оценка перспектив клинического применения рецептор-ориентированных подходов в лечении женщин в постменопаузе.

Материалы и методы исследования

При подготовке научного обзора использованы отдельные положения рекомендаций PRISMA 2020, касающиеся структурированного поиска, отбора и представления публикаций [16]. Поиск научной литературы проводили в электронных базах данных PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science и eLIBRARY.RU.

В обзор включали публикации, посвященные роли рецепторов эстрогенов (ER α , ER β и GPER) в регуляции сосудистой функции, механизмах сосудистого старения и клиническим аспектам менопаузальной гормональной терапии. Анализировали оригинальные исследования, систематические обзоры, метаанализы, клинические рекомендации и экспертные консенсусы, опубликованные в период с 1993 по 2026 г. Публикации более ранних лет включали только при наличии их фундаментального значения для понимания молекулярных механизмов эстрогеновой сигнализации и регуляции сосудистой функции (например, исследования, посвященные роли оксида азота и эндотелиальной NO-синтазы).

Критериями включения являлись публикации на русском и английском языках, содержащие данные о молекулярных механизмах действия рецепторов эстрогенов, возрастных изменениях сосудистой стенки, сосудистом старении, а также клинических аспектах применения менопаузальной гормональной терапии. Исключали публикации, не соответствующие тематике обзора, тезисы конференций без полнотекстовой публикации, дублирующие работы, редакционные статьи и исследования с недостаточным описанием методологии.

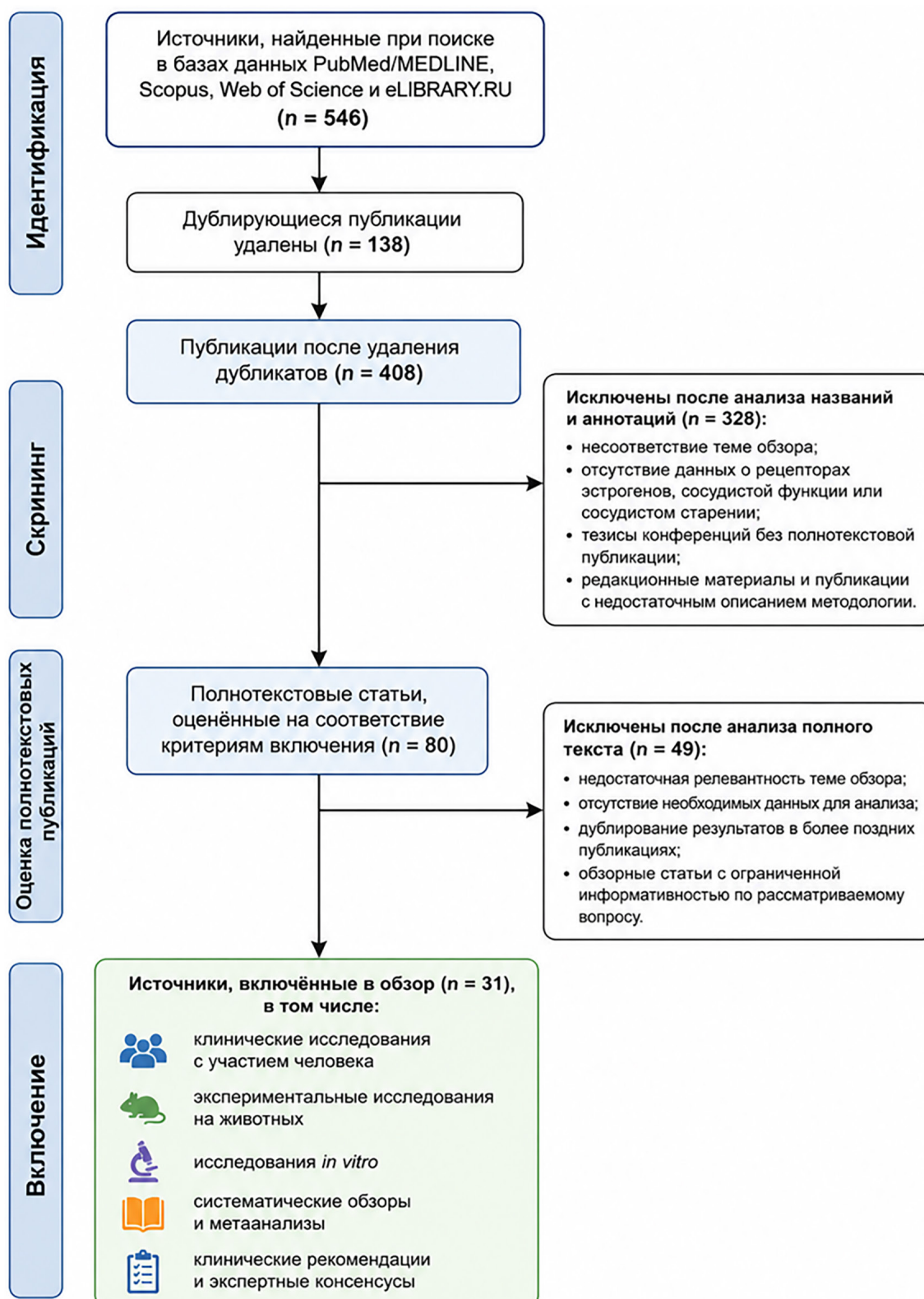


Схема отбора публикаций в соответствии с рекомендациями PRISMA, 2020
Примечание: составлен авторами на основе источника [16]

Таблица 1

Характеристика исследований, включенных в обзор

Категория публикаций	Характеристика	Цель использования в настоящем обзоре
Клинические исследования с участием человека	Рандомизированные клинические исследования, когортные исследования и клинические наблюдения	Анализ клинического значения рецепторов эстрогенов, возрастных изменений сосудистой системы, концепции «терапевтического окна» и применения менопаузальной гормональной терапии
Экспериментальные исследования на животных	Исследования на моделях сосудистого старения, артериальной гипертензии и дефицита эстрогенов	Изучение роли ER α , ER β и GPER в регуляции сосудистой функции и механизмов сосудистого старения
Исследования <i>in vitro</i>	Исследования на культурах эндотелиальных и гладкомышечных клеток сосудов	Анализ молекулярных механизмов эстрогеновой сигнализации, внутриклеточных сигнальных путей и функций рецепторов эстрогенов
Систематические обзоры и метаанализы	Обобщение результатов экспериментальных и клинических исследований	Оценка современного состояния проблемы и подтверждение наиболее воспроизводимых данных
Клинические рекомендации и экспертные консенсусы	Российские и международные рекомендации по артериальной гипертензии и менопаузальной гормональной терапии	Анализ современных клинических подходов к ведению женщин в постменопаузальном периоде

Примечание: составлена авторами на основе выбранных для составления обзора источников.

После объединения результатов поиска дублирующиеся публикации удаляли путем сопоставления названий, авторского состава, года публикации и идентификатора DOI. В итоговый обзор включали публикации, соответствовавшие критериям включения и обладавшие высокой релевантностью цели настоящего обзора.

Для удобства анализа включенные публикации были распределены на клинические исследования с участием человека, экспериментальные исследования на животных, исследования *in vitro*, систематические обзоры и метаанализы, а также клинические рекомендации и экспертные консенсусы. Качество и уровень доказательности публикаций оценивали качественно с учетом дизайна исследования, полноты описания методологии и соответствия цели обзора. Наибольший уровень уверенности при интерпретации результатов придавали данным крупных клинических исследований, систематических обзоров, метаанализов и действующих клинических рекомендаций, тогда как результаты экспериментальных исследований использовали преимущественно для объяснения молекулярных механизмов. Формальную количественную оценку риска систематической ошибки с использованием специализированных инструментов не проводили, поскольку настоящее исследование представляет собой описательный научный обзор и не предусматривало выполнение метаанализа.

Схема отбора публикаций представлена на рисунке, а характеристика исследований, включенных в обзор, – в табл. 1.

Результаты исследования и их обсуждение

Проведенный анализ современной отечественной и зарубежной научной литературы позволил систематизировать имеющиеся данные о роли рецепторов эстрогенов в регуляции сосудистой функции и механизмах сосудистого старения у женщин в постменопаузе. Выявлено, что рецепторы ER α , ER β и GPER участвуют в поддержании сосудистого гомеостаза посредством регуляции эндотелиальной функции, сосудистого тонуса, воспалительных процессов, оксидативного стресса, клеточной пролиферации и репарации сосудистой стенки. Анализ опубликованных исследований также показал, что возрастные изменения экспрессии и функциональной активности рецепторов эстрогенов могут играть существенную роль в снижении вазопротективных эффектов эстрогенов и определять эффективность менопаузальной гормональной терапии.

Биологическая роль эстрогенов в поддержании сосудистого гомеостаза. Сосудистый гомеостаз представляет собой совокупность взаимосвязанных молекулярных и клеточных механизмов, обеспечивающих сохранение структуры и функции сосудистой стенки, регуляцию сосудистого тонуса, гемостаза, воспалительных реакций и про-

цессов тканевой репарации. Центральная роль в этих процессах принадлежит эндотелию, который рассматривается как высокоактивный эндокринный орган, синтезирующий широкий спектр биологически активных веществ, регулирующих сосудистую проницаемость, адгезию клеток крови, вазомоторные реакции и ремоделирование сосудов [6, 17].

Одним из основных физиологических регуляторов сосудистой функции являются эстрогены, прежде всего 17β -эстрадиол (E_2) – главный эстроген репродуктивного периода женщины. Помимо влияния на репродуктивную систему эстрогены участвуют в регуляции деятельности эндотелиальных и гладкомышечных клеток сосудов, иммунокомпетентных клеток, макрофагов и тромбоцитов, обеспечивая комплексную защиту сердечно-сосудистой системы до наступления менопаузы [6, 7].

Наиболее изученным механизмом сосудистого действия эстрогенов является стимуляция синтеза оксида азота (NO). Связывание 17β -эстрадиола с рецепторами эстрогенов активирует эндотелиальную NO-синтазу (eNOS), что сопровождается увеличением продукции NO, расслаблением гладкомышечных клеток сосудистой стенки и развитием эндотелий-зависимой вазодилатации. Кроме регуляции сосудистого тонуса оксид азота ингибирует агрегацию тромбоцитов, снижает адгезию лейкоцитов к эндотелию и ограничивает пролиферацию гладкомышечных клеток, препятствуя развитию атеросклеротических изменений [6, 15, 17].

Существенное значение имеет и противовоспалительное действие эстрогенов. Их влияние сопровождается снижением активности сигнального пути NF- κ B, уменьшением продукции провоспалительных цитокинов, включая IL-1 β , IL-6 и TNF- α , а также ограничением инфильтрации сосудистой стенки воспалительными клетками. В результате поддерживается функциональное состояние эндотелия и снижается выраженность хронического сосудистого воспаления, которое рассматривается как один из ключевых факторов сосудистого старения [6, 15, 18].

Кардиопротективные свойства эстрогенов также связаны со способностью ограничивать оксидативный стресс. Под их влиянием уменьшается образование активных форм кислорода, повышается активность антиоксидантных ферментов, в том числе супероксиддисмутазы и глутатионпероксидазы, а также сохраняется функциональная активность митохондрий [7, 18, 19]. Это способствует сохранению биодоступности

оксида азота, уменьшению повреждения эндотелия и замедлению возрастных изменений сосудистой стенки.

Немаловажную роль эстрогены играют и в процессах восстановления сосудов после повреждения. Экспериментальные исследования показали, что активация рецепторов эстрогенов усиливает миграцию и пролиферацию эндотелиальных клеток, ускоряет реэндотелизацию и ограничивает развитие неинтимальной гиперплазии [6, 20]. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют, что эти эффекты могут иметь практическое значение [20].

Таким образом, сосудистые эффекты эстрогенов реализуются посредством комплексного воздействия на эндотелиальную функцию, сосудистый тонус, воспалительные процессы, оксидативный стресс, а также процессы ремоделирования и репарации сосудистой стенки. Нарушение этих механизмов при снижении уровня эстрогенов после менопаузы способствует развитию сосудистого старения и повышению сердечно-сосудистого риска. Вместе с тем накопленные данные свидетельствуют о том, что важно не только уменьшение концентрации циркулирующих эстрогенов, но и изменение рецепторопосредованной регуляции сосудистого гомеостаза, что определяет актуальность дальнейшего изучения рецепторов эстрогенов как потенциальных молекулярных мишеней [6, 10, 15].

Возрастные изменения сосудистой стенки и механизмы сосудистого старения. Сосудистое старение представляет собой закономерный биологический процесс, сопровождающийся постепенными структурными и функциональными изменениями сосудистой стенки, что приводит к снижению ее эластичности, нарушению вазомоторной функции и увеличению риска сердечно-сосудистых заболеваний [15, 19]. В настоящее время сосудистое старение рассматривается не только как проявление хронологического возраста, но и как самостоятельный патофизиологический процесс, тесно связанный с развитием артериальной гипертензии, атеросклероза, хронической болезни почек, сахарного диабета и сердечной недостаточности [1, 19].

Наиболее ранним проявлением возрастных сосудистых изменений считается эндотелиальная дисфункция, характеризующаяся утратой способности эндотелия поддерживать сосудистый гомеостаз [6, 10]. Снижение продукции оксида азота, усиление синтеза вазоконстрикторных факторов, повышение проницаемости сосудистой стенки и активация адгезии воспалитель-

ных клеток создают условия для развития хронического воспаления и патологического сосудистого ремоделирования [17, 19]. У женщин выраженность этих нарушений существенно возрастает после наступления менопаузы, что связывают с уменьшением продукции эндогенных эстрогенов [5].

Характерной особенностью сосудистого старения является также прогрессирующее увеличение артериальной жесткости. В его основе лежат деградация эластических волокон, накопление коллагена, изменения внеклеточного матрикса и кальцификация сосудистой стенки [19, 20]. Эти процессы сопровождаются повышением скорости распространения пульсовой волны, увеличением систолического артериального давления и дополнительной нагрузкой на миокард, вследствие чего артериальная жесткость рассматривается как независимый предиктор сердечно-сосудистых осложнений [1, 20].

Существенный вклад в развитие сосудистого старения вносит хроническое низкоинтенсивное воспаление (inflammaging), характеризующееся длительной активацией врожденного иммунитета и повышенной продукцией провоспалительных медиаторов [20]. Возрастное повышение уровней IL-1 β , IL-6, TNF- α и других цитокинов способствует развитию эндотелиальной дисфункции, усилению оксидативного стресса и активации процессов сосудистого ремоделирования [18, 19].

Важным звеном патогенеза сосудистого старения является оксидативный стресс, возникающий при нарушении равновесия между образованием активных форм кислорода и возможностями антиоксидантной системы [7, 19]. Избыточное накопление свободных радикалов приводит к повреждению липидов, белков и ДНК, снижению биодоступности оксида азота, нарушению функции митохондрий и активации сигнальных путей клеточного старения [6, 19].

В последние годы особое внимание уделяется роли клеточного старения (cellular senescence). Сенесцентные эндотелиальные и гладкомышечные клетки утрачивают способность к пролиферации, характеризуются снижением регенераторного потенциала и формированием секреторного фенотипа (senescence-associated secretory phenotype, SASP), сопровождающегося выделением провоспалительных цитокинов, факторов роста и матриксных металлопротеиназ [20]. Это поддерживает хроническое воспаление, способствует деградации внеклеточного матрикса и дальнейшему ухудшению функционального состояния сосудистой стенки [19, 20].

Таким образом, сосудистое старение представляет собой сложный многофакторный процесс, включающий эндотелиальную дисфункцию, хроническое воспаление, оксидативный стресс, митохондриальную дисфункцию, ремоделирование сосудистой стенки и клеточное старение [21]. Современные данные свидетельствуют о том, что многие из этих процессов находятся под влиянием эстрогеновой сигнализации. Это позволяет рассматривать рецепторы ER α , ER β и GPER как важные регуляторы возрастных изменений сосудистой стенки и перспективные молекулярные мишени для дальнейших исследований, направленных на изучение механизмов сосудистого старения и разработку новых терапевтических подходов [10, 13, 15].

Рецепторы эстрогенов как ключевые регуляторы сосудистой функции. Биологическое действие эстрогенов реализуется посредством взаимодействия со специфическими рецепторами, экспрессируемыми в различных тканях организма, включая сосудистую стенку и клетки сердечно-сосудистой системы. В настоящее время выделяют три основных типа рецепторов эстрогенов: классические ядерные рецепторы ER α (Estrogen Receptor alpha) и ER β (Estrogen Receptor beta), а также мембранный G-белок-связанный рецептор GPER (GPER1) [6, 7, 13]. Несмотря на общий естественный лиганд, эти рецепторы различаются по тканевой экспрессии, механизмам внутриклеточной передачи сигнала и функциональному значению, что определяет широкий спектр сосудистых эффектов эстрогенов.

Рецепторы ER α и ER β относятся к суперсемейству ядерных рецепторов и преимущественно функционируют как лиганд-зависимые транскрипционные факторы. После связывания с 17 β -эстрадиолом активированный рецепторный комплекс взаимодействует с эстроген-чувствительными элементами ДНК (Estrogen Response Elements, ERE), регулируя экспрессию генов, участвующих в контроле воспалительных процессов, сосудистого тонуса, клеточной пролиферации и ремоделирования сосудистой стенки [6, 7]. Помимо геномных эффектов, ER α и ER β способны быстро активировать сигнальные пути PI3K/Akt, MAPK и эндотелиальную NO-синтазу (eNOS), обеспечивая развитие быстрых сосудистых реакций [6, 22].

Представления о механизмах действия эстрогенов существенно расширились после открытия мембранного рецептора GPER. В отличие от классических ядерных рецепторов, GPER относится к семейству рецепторов, сопряженных с G-белками, и преимущественно

пешественно участвует в реализации быстрых негеномных эффектов. Активация GPER сопровождается регуляцией сосудистого тонуса, внутриклеточного кальциевого обмена, активности аденилатциклазы и функций эндотелия. Экспериментальные исследования показывают, что стимуляция GPER способствует развитию вазодилатации, уменьшению сосудистого воспаления и снижению выраженности артериальной гипертензии, хотя значение этого рецептора в развитии сердечно-сосудистых эффектов эстрогенов продолжает активно изучаться [7, 13, 23].

Физиологические эффекты эстрогенов определяются не изолированным действием отдельных рецепторов, а их согласованным функционированием. Взаимодействие геномных и негеномных механизмов обеспечивает регуляцию эндотелиальной функции, сосудистого ремоделирования и адаптацию сосудистой стенки к изменяющимся гемодинамическим условиям [6, 7]. Нарушение этой координации рассматривается как один из механизмов прогрессирования сосудистой дисфункции при старении.

Особое значение возрастные изменения рецепторной сигнализации приобретают в постменопаузальном периоде. Снижение уровня эстрогенов сопровождается не только уменьшением степени активации рецепторов, но и возрастными изменениями их экспрессии, субклеточной локализации и эффективности внутриклеточной передачи сигнала [10]. В связи с этим сосудистое старение все чаще рассматривается как результат нарушения функционирования системы «эстроген – рецептор – сигнальный путь», а не исключительно как следствие гормонального дефицита [15].

Таким образом, рецепторы эстрогенов являются центральным звеном молекулярной регуляции сосудистой функции. Согласованное функционирование ER α , ER β и GPER обеспечивает регуляцию сосудистого тонуса, эндотелиальной функции, воспалительных процессов, оксидативного стресса, клеточной пролиферации и репарации сосудистой стенки. Современные данные свидетельствуют о том, что выраженность сосудистых эффектов эстрогенов определяется не только концентрацией 17 β -эстрадиола, но и функциональным состоянием рецепторной системы, поэтому возрастные изменения экспрессии и активности рецепторов рассматриваются как один из механизмов сосудистого старения и снижения чувствительности сосудистой стенки к действию эстрогенов [6, 10, 15].

Рецептор ER α как основной медиатор сосудистых эффектов эстрогенов. Среди известных рецепторов эстрогенов ER α

(Estrogen Receptor alpha) рассматривается как основной медиатор кардиоваскулярных эффектов 17 β -эстрадиола в сосудистой системе [6, 10, 15]. Высокий уровень его экспрессии выявлен в эндотелиальных и гладкомышечных клетках сосудов, кардиомиоцитах, а также клетках иммунной системы, что определяет ведущую роль рецептора в поддержании сосудистого гомеостаза [6, 15]. Экспериментальные модели с инактивацией гена ESR1, кодирующего ER α , продемонстрировали значительное ослабление вазопротективных эффектов эстрогенов, сопровождающееся нарушением эндотелий-зависимой вазодилатации, усилением сосудистого воспаления и ускорением ремоделирования сосудистой стенки [6, 15].

Функциональная активность ER α реализуется посредством геномных и негеномных механизмов. Геномный путь связан со связыванием рецептора с 17 β -эстрадиолом и последующей регуляцией транскрипции генов через взаимодействие с эстроген-чувствительными элементами ДНК (ERE), что влияет на процессы клеточной пролиферации, воспаления, синтеза компонентов внеклеточного матрикса и сосудистого тонуса. Негеномные эффекты развиваются значительно быстрее и обусловлены активацией мембранных форм ER α с последующим вовлечением сигнальных путей PI3K/Akt, MAPK/ERK и Src-киназ, обеспечивающих быструю активацию эндотелиальной NO-синтазы (eNOS) и увеличение продукции оксида азота [6, 22].

Важным направлением действия ER α является регуляция воспалительного ответа. Его активация сопровождается ингибированием сигнального пути NF- κ B, уменьшением экспрессии молекул клеточной адгезии (VCAM-1, ICAM-1), снижением продукции провоспалительных цитокинов IL-1 β , IL-6 и TNF- α , а также ограничением миграции моноцитов в сосудистую стенку [6, 18]. Это сопровождается уменьшением выраженности хронического сосудистого воспаления, которое рассматривается как один из ключевых механизмов сосудистого старения.

Помимо влияния на сосудистый тонус и воспалительные процессы ER α участвует в восстановлении эндотелия после повреждения. Экспериментальные исследования показали, что активация рецептора усиливает миграцию и пролиферацию эндотелиальных клеток, ускоряет процессы реэндотелизации и ограничивает развитие неоинтимальной гиперплазии [22, 24]. Эти эффекты имеют практическое значение после ангиопластики, стентирования и других эндоваскулярных вмешательств, поскольку способствуют восстановлению функцио-

нальной целостности сосудистой стенки и снижению риска рестеноза.

Возрастные изменения существенно влияют на функционирование ER α . По данным экспериментальных исследований, старение сопровождается снижением экспрессии рецептора, нарушением его мембранной локализации и уменьшением эффективности внутриклеточной передачи сигнала [10, 15]. Следствием этих процессов являются снижение синтеза оксида азота, усиление оксидативного стресса и воспалительной активности, а также уменьшение чувствительности сосудистой стенки к действию эндогенных и экзогенных эстрогенов. Именно эти изменения рассматриваются как одно из возможных объяснений различий в сосудистом ответе при применении менопаузальной гормональной терапии, назначаемой по индивидуальному показанию для лечения менопаузальных симптомов.

Таким образом, ER α рассматривается как ключевой регулятор сосудистых эффектов эстрогенов, обеспечивающий поддержание эндотелиальной функции, противовоспалительную и антиоксидантную защиту, а также процессы восстановления сосудистой стенки. Имеющиеся экспериментальные данные и ограниченные клинические наблюдения позволяют предположить, что возрастные изменения экспрессии и функциональной активности ER α могут способствовать развитию сосудистой дисфункции, снижению чувствительности сосудистой стенки к действию эстрогенов и повышению сердечно-сосудистого риска у женщин после менопаузы. Это определяет высокий интерес к дальнейшему изучению ER α как потенциальной молекулярной мишени для разработки новых терапевтических подходов, однако клиническое значение подобных стратегий требует дальнейшего подтверждения [10, 15].

Роль ER β в регуляции сосудистой функции. Рецептор ER β (Estrogen Receptor beta) является вторым классическим рецептором эстрогенов и наряду с ER α участвует в реализации сосудистых эффектов 17 β -эстрадиола. Несмотря на значительное структурное сходство с ER α , рецептор ER β отличается особенностями тканевой экспрессии, механизмами внутриклеточной передачи сигнала и спектром физиологических функций, что определяет его самостоятельное значение в поддержании сосудистого гомеостаза [6, 7, 15]. Экспрессия ER β выявлена в эндотелиальных и гладкомышечных клетках сосудов, кардиомиоцитах, фибробластах и клетках иммунной системы [6, 15].

В отличие от ER α , который преимущественно обеспечивает быстрые вазо-

дилатирующие эффекты эстрогенов, ER β в большей степени участвует в регуляции воспалительных процессов, клеточной пролиферации, сосудистого ремоделирования и сохранении структурной целостности сосудистой стенки. После связывания с 17 β -эстрадиолом рецептор активирует главным образом геномные механизмы регуляции транскрипции, влияя на экспрессию генов, контролирующих синтез компонентов внеклеточного матрикса, клеточный цикл и воспалительный ответ.

Одним из наиболее значимых эффектов ER β считается ограничение хронического сосудистого воспаления. Экспериментальные исследования показали, что активация рецептора сопровождается ингибированием сигнального пути NF- κ B, снижением экспрессии молекул клеточной адгезии, уменьшением продукции провоспалительных цитокинов IL-1 β , IL-6 и TNF- α , а также ограничением инфильтрации сосудистой стенки воспалительными клетками [7, 18]. Эти изменения способствуют поддержанию функционального состояния эндотелия и замедлению развития возраст-ассоциированных сосудистых нарушений [15, 18].

Наряду с противовоспалительным действием ER β участвует в регуляции оксидативного стресса. Его активация ассоциируется с повышением активности антиоксидантных ферментов, уменьшением образования активных форм кислорода и сохранением биодоступности оксида азота [7, 18]. Благодаря этому снижается степень повреждения эндотелиальных клеток, замедляется развитие эндотелиальной дисфункции и поддерживаются физиологические свойства сосудистой стенки [15].

Существенное значение имеет влияние ER β на пролиферацию и миграцию гладкомышечных клеток сосудов. Избыточная пролиферация этих клеток рассматривается как один из механизмов развития атеросклероза, рестеноза после эндоваскулярных вмешательств и патологического сосудистого ремоделирования. Экспериментальные данные свидетельствуют, что стимуляция ER β ограничивает данные процессы и уменьшает выраженность неинтимальной гиперплазии, способствуя сохранению нормальной архитектоники сосудистой стенки [6, 15].

В последние годы обсуждается возможное участие ER β в механизмах клеточного старения. Предполагается, что активация рецептора способствует поддержанию митохондриальной функции, уменьшению выраженности сенесцентного фенотипа эндотелиальных клеток и снижению хронического воспаления, сопровождающего

сосудистое старение [15, 19]. Хотя молекулярные механизмы этих процессов требуют дальнейшего изучения, имеющиеся экспериментальные данные подтверждают участие ER β в поддержании функционального состояния сосудистой стенки.

Функции ER β тесно взаимосвязаны с активностью ER α , и их нельзя рассматривать изолированно. В физиологических условиях оба рецептора образуют единую регуляторную систему, обеспечивающую реализацию сосудистых эффектов эстрогенов [6, 7]. Если ER α преимущественно отвечает за быстрые вазодилатирующие реакции и активацию eNOS, то ER β играет более заметную роль в долгосрочном контроле воспаления, сосудистого ремоделирования и клеточной пролиферации. Такое функциональное разделение обеспечивает комплексную защиту сосудистой стенки при воздействии возрастных и метаболических факторов [15].

Возрастные изменения экспрессии ER β изучены значительно меньше, чем изменения ER α . Тем не менее имеющиеся данные позволяют предположить, что снижение активности рецептора сопровождается усилением хронического воспаления, прогрессированием сосудистого ремоделирования и повышением артериальной жесткости у женщин в постменопаузе [15, 19]. Это позволяет рассматривать ER β как потенциальную молекулярную мишень для разработки селективных агонистов рецепторов эстрогенов, однако клиническая эффективность подобных подходов пока не доказана.

Таким образом, ER β играет самостоятельную роль в поддержании структурной и функциональной целостности сосудистой стенки, участвуя в регуляции воспалительных процессов, оксидативного стресса и сосудистого ремоделирования. Совместная активность ER α и ER β обеспечивает комплексную реализацию сосудистых эффектов эстрогенов, тогда как возрастные изменения функциональной активности ER β могут способствовать прогрессированию сосудистого старения. Несмотря на перспективность данного рецептора как потенциальной молекулярной мишени, его клиническое значение и возможности селективной фармакологической модуляции требуют дальнейшего изучения [15, 19].

GPER как новый регулятор сосудистой функции. Открытие G-белок-связанного рецептора эстрогенов (GPER, ранее GPR30) существенно расширило представления о механизмах эстрогеновой сигнализации в сердечно-сосудистой системе [13, 23, 25]. В отличие от классических ядерных рецепторов ER α и ER β , GPER относится к семейству рецепторов, сопряженных с G-белками,

и преимущественно обеспечивает быстрые негеномные эффекты эстрогенов. Его экспрессия обнаружена в эндотелиальных и гладкомышечных клетках сосудов, кардиомиоцитах, макрофагах и других клетках сердечно-сосудистой системы, что указывает на участие данного рецептора в поддержании сосудистого гомеостаза.

Активация GPER сопровождается включением нескольких внутриклеточных сигнальных каскадов, включая аденилатциклазную систему, пути PI3K/Akt, MAPK/ERK и EGFR-трансактивацию [7, 13, 23]. Это приводит к быстрой активации эндотелиальной NO-синтазы (eNOS), увеличению продукции оксида азота и развитию эндотелий-зависимой вазодилатации. В отличие от геномных механизмов, реализуемых через ER α и ER β , эффекты GPER развиваются в течение нескольких минут после связывания рецептора с эстрогеном [13, 23].

По данным экспериментальных исследований, стимуляция GPER способствует снижению сосудистого сопротивления, улучшению эндотелиальной функции и уменьшению уровня артериального давления. На моделях артериальной гипертензии активация рецептора сопровождалась уменьшением выраженности сосудистого ремоделирования, снижением артериальной жесткости и улучшением сосудистой реактивности [23, 25]. Эти результаты свидетельствуют о возможном участии GPER в регуляции системной гемодинамики и поддержании нормальной функции сосудистой стенки.

Помимо влияния на сосудистый тонус GPER участвует в регуляции воспалительного ответа. Его активация сопровождается снижением активности сигнального пути NF- κ B, уменьшением продукции провоспалительных цитокинов и ограничением инфильтрации сосудистой стенки воспалительными клетками. Одновременно уменьшается выраженность оксидативного стресса вследствие снижения образования активных форм кислорода и сохранения биодоступности оксида азота [7, 13, 25].

В последние годы активно изучается участие GPER в процессах сосудистого старения. Экспериментальные данные свидетельствуют, что стимуляция рецептора способствует сохранению функции эндотелиальных клеток, уменьшению накопления сенесцентных клеток и ограничению развития фиброзных изменений сосудистой стенки [13, 15, 25]. Предполагается, что эти эффекты связаны с регуляцией митохондриальной функции, внутриклеточного кальциевого обмена и антиоксидантной защиты, однако соответствующие молекулярные механизмы требуют дальнейшего изучения.

Таблица 2

Сравнительная характеристика основных рецепторов эстрогенов
и их роли в регуляции сосудистой функции

Рецептор	Основная локализация	Основные механизмы действия	Основные сосудистые эффекты	Изменения при старении
ER α	Эндотелиальные клетки, гладкомышечные клетки сосудов	Геномные и быстрые негеномные сигнальные пути (PI3K/Akt, eNOS) [6, 22]	Вазодилатация, увеличение продукции NO, противовоспалительное действие, ускорение реэндотелизации [6, 24]	Предполагаемое снижение экспрессии и функциональной активности, уменьшение синтеза NO, ослабление вазопротективных эффектов [10, 15]
ER β	Эндотелий, иммунные клетки, гладкомышечные клетки	Преимущественно геномная регуляция экспрессии генов [6, 7]	Ограничение воспаления, снижение оксидативного стресса, торможение сосудистого ремоделирования [15, 18]	Предполагаемое снижение функциональной активности, усиление воспаления и ремоделирования [15, 19]
GPER	Мембраны эндотелиальных и гладкомышечных клеток	Быстрые негеномные сигнальные пути (PI3K/Akt, MAPK, EGFR) [13, 23]	Быстрая вазодилатация, снижение сосудистого тонуса, противовоспалительное действие [13, 25]	Предполагаемое снижение экспрессии и эффективности сигнальных путей [15, 25]

Примечание: составлена авторами на основе указанных в таблице источников литературы.

Особый интерес представляет возможность фармакологической активации GPER с использованием селективных агонистов. Предполагается, что подобный подход способен обеспечивать отдельные сосудистые эффекты эстрогенов без одновременной активации всех типов эстрогеновых рецепторов, однако эти предположения основаны преимущественно на экспериментальных исследованиях [13, 25]. Клиническое значение селективной стимуляции GPER и ее возможные преимущества в отношении безопасности и эффективности пока окончательно не установлены и требуют подтверждения в дальнейших клинических исследованиях [13].

Таким образом, GPER является важным компонентом эстрогеновой сигнализации, обеспечивающим быстрые сосудистые эффекты эстрогенов и участвующим в регуляции сосудистого тонуса, воспалительных процессов, оксидативного стресса и сосудистого ремоделирования. Несмотря на убедительные результаты экспериментальных исследований, клиническое значение GPER окончательно не определено. Это позволяет рассматривать данный рецептор как перспективную молекулярную мишень для дальнейших исследований, направленных на разработку новых подходов к коррекции сосудистого старения и сердечно-сосудистых заболеваний [13, 23, 25].

Для наглядного сопоставления основных характеристик рецепторов эстрогенов их ключевые особенности представлены в табл. 2.

Возрастные изменения экспрессии рецепторов эстрогенов и нарушение эстрогеновой сигнализации. Долгое время повышение сердечно-сосудистого риска у женщин после менопаузы объясняли преимущественно снижением концентрации циркулирующих эстрогенов. Однако современные данные свидетельствуют о том, что возрастные изменения сосудистой системы обусловлены не только гормональным дефицитом, но и нарушением функционирования рецепторного аппарата эстрогенов [6, 10, 15]. Старение сопровождается изменением экспрессии ER α , ER β и GPER, нарушением их субклеточной локализации, снижением эффективности внутриклеточной передачи сигнала и уменьшением чувствительности сосудистой стенки к действию эстрогенов [6, 15, 25].

Наиболее подробно изучены возрастные изменения ER α . Экспериментальные исследования показали, что с возрастом уменьшается экспрессия рецептора в эндотелиальных и гладкомышечных клетках сосудов, а также снижается количество его мембранной формы, обеспечивающей быстрые негеномные эффекты эстрогенов. Это сопровождается ослаблением активации эндотелиальной NO-синтазы (eNOS),

уменьшением продукции оксида азота, снижением эндотелий-зависимой вазодилатации и ухудшением адаптации сосудистой стенки к гемодинамическим нагрузкам [6, 10, 22].

Возрастные изменения ER β изучены менее подробно, однако имеющиеся данные указывают на снижение его функциональной активности, сопровождающееся усилением воспалительных процессов, нарушением контроля клеточной пролиферации и прогрессированием сосудистого ремоделирования [15, 18]. Предполагается, что изменение соотношения активности ER α и ER β способствует нарушению физиологического баланса между вазопротективными и провоспалительными сигнальными механизмами.

Все большее внимание уделяется возрастным изменениям GPER. Согласно имеющимся преимущественно экспериментальным данным, возрастные изменения экспрессии и функциональной активности этого рецептора могут сопровождаться ухудшением эндотелиальной функции, уменьшением продукции оксида азота и повышением артериальной жесткости. Кроме того, предполагается, что при старении снижается эффективность GPER-опосредованной вазодилатации, что может ограничивать компенсаторные возможности сосудистой системы [13, 15, 25].

Существенный вклад в нарушение эстрогеновой сигнализации вносят эпигенетические механизмы. Возраст сопровождается изменением метилирования ДНК, модификацией гистонов и нарушением регуляции микроРНК, контролирующей экспрессию генов ESR1, ESR2 и GPER1 [26, 27]. В результате снижается чувствительность сосудистой стенки к действию эстрогенов, что может наблюдаться даже при сохранении их достаточной концентрации [15, 26].

Дополнительное значение имеют оксидативный стресс и хроническое воспаление, которые нарушают передачу внутриклеточного сигнала. Избыточное образование активных форм кислорода приводит к повреждению сигнальных белков, снижению активности пути PI3K/Akt и нарушению фосфорилирования eNOS [10, 17, 22]. Одновременно хроническое воспаление изменяет экспрессию рецепторов, их внутриклеточный транспорт и эффективность взаимодействия с эстрогенами [17, 19, 27].

Возрастные изменения рецепторной системы имеют важное клиническое значение. Нарушение экспрессии и функциональной активности рецепторов рассматривается как одно из возможных объяснений концепции «терапевтического окна», согласно

которой особенности сосудистого ответа при применении менопаузальной гормональной терапии могут зависеть от времени ее назначения [9, 11, 12]. При этом менопаузальная гормональная терапия применяется прежде всего для лечения менопаузальных симптомов после индивидуальной оценки показаний, противопоказаний и соотношения пользы и риска. Предполагается, что при более раннем начале терапии функциональная активность рецепторной системы сохраняется в большей степени, тогда как выраженные возрастные изменения сосудистой стенки и рецепторного аппарата могут ограничивать сосудистый ответ на лечение [10, 12].

Таким образом, снижение сосудистой защиты после менопаузы обусловлено не только уменьшением уровня циркулирующих эстрогенов, но и комплексом возрастных изменений системы эстрогеновой сигнализации. Нарушение экспрессии и функции ER α , ER β и GPER рассматривается как один из вероятных механизмов сосудистого старения. Дальнейшее изучение этих процессов может способствовать разработке новых подходов, направленных на повышение чувствительности сосудистой стенки к действию эстрогенов, однако их клиническая эффективность требует дальнейшего подтверждения [10, 12, 15].

Клиническое значение рецепторов эстрогенов и перспективы терапевтического применения. Результаты экспериментальных исследований последних десятилетий существенно расширили представления о роли рецепторов эстрогенов в регуляции сосудистой функции. Однако внедрение этих данных в клиническую практику остается одной из актуальных задач современной кардиологии и эндокринологии [8, 28]. Несмотря на убедительные экспериментальные данные о вазопротективных эффектах эстрогенов, результаты крупных клинических исследований не подтвердили возможность использования менопаузальной гормональной терапии (МГТ) для профилактики сердечно-сосудистых заболеваний и оказались неоднозначными [11, 12].

Значительное влияние на современные подходы к применению МГТ оказали результаты исследования Women's Health Initiative (WHI), опубликованные в 2002 г. [8]. У женщин, начавших гормональную терапию спустя длительное время после наступления менопаузы, не было выявлено ожидаемого снижения частоты сердечно-сосудистых осложнений. Более того, в отдельных группах пациенток отмечалось увеличение риска тромбозомболических ос-

ложений и инсульта, что привело к пересмотру показаний и принципов назначения МГТ [8, 29].

Отдельное внимание в последние годы уделяется изучению эстетрола (Е4) – естественного эстрогена с тканеспецифическими фармакологическими свойствами [30]. Имеющиеся данные свидетельствуют о его потенциальных преимуществах с точки зрения механизма действия и профиля безопасности, однако опубликованные результаты в основном основаны на доклинических исследованиях, фармакологических данных и ограниченном числе клинических наблюдений [30]. Следует учитывать, что имеющийся обзор посвящен преимущественно вопросам фармакологии эстетрола и не предоставляет самостоятельных доказательств его сердечно-сосудистой безопасности или способности снижать риск сердечно-сосудистых осложнений. Поэтому возможное влияние препаратов на основе эстетрола на сердечно-сосудистую систему требует подтверждения в независимых крупных рандомизированных клинических исследованиях.

В настоящее время МГТ не рекомендуется назначать исключительно с целью профилактики сердечно-сосудистых заболеваний; ее применение рассматривается прежде всего как метод лечения менопаузальных симптомов после индивидуальной оценки показаний, противопоказаний и соотношения пользы и риска [9, 28, 31].

Дальнейшее развитие данной концепции связано с исследованием ELITE (Early versus Late Intervention Trial with Estradiol), результаты которого легли в основу гипотезы «терапевтического окна» [11]. Результаты исследования показали, что при раннем назначении МГТ у женщин с соответствующими показаниями наблюдалось более благоприятное влияние на отдельные показатели состояния сосудистой стенки по сравнению с поздним началом терапии [11]. Полученные данные позволяют предположить, что сосудистый ответ на лечение определяется не только концентрацией эстрогенов, но и функциональным состоянием сосудистой стенки и сохранностью рецепторной сигнализации [12]. Вместе с тем эти результаты не являются доказательством эффективности МГТ для профилактики сердечно-сосудистых заболеваний [11, 12].

Современные исследования позволяют предположить, что возрастные изменения экспрессии и функциональной активности рецепторов эстрогенов могут ограничивать сосудистый ответ на МГТ у женщин старших возрастных групп [10, 12]. При позднем начале терапии выраженные структурные

изменения сосудистой стенки, хроническое воспаление, оксидативный стресс и нарушения внутриклеточной передачи сигнала способны снижать чувствительность сосудов к действию эстрогенов [11, 19, 22]. В этой связи состояние рецепторной системы рассматривается как один из возможных факторов, влияющих на клинический ответ на гормональную терапию, однако его значение требует дальнейшего подтверждения в исследованиях с участием человека.

В связи с этим возрастает интерес к разработке препаратов, избирательно воздействующих на отдельные рецепторы эстрогенов. В качестве перспективных направлений рассматриваются селективные модуляторы рецепторов эстрогенов (SERMs) и селективные агонисты GPER, которые потенциально способны сохранять сосудистые эффекты эстрогенов при меньшем риске нежелательных воздействий на молочную железу и эндометрий [13, 14, 25]. Однако большинство имеющихся данных получено в экспериментальных исследованиях, поэтому клиническая эффективность подобных подходов требует дальнейшего подтверждения [13, 25].

В Российской Федерации современные подходы к применению менопаузальной гормональной терапии отражены в клинических рекомендациях и экспертных консенсусах профильных профессиональных обществ [9, 31]. Согласно действующим рекомендациям, решение о назначении МГТ должно приниматься индивидуально с учетом возраста пациентки, времени, прошедшего после наступления менопаузы, сердечно-сосудистого риска, сопутствующих заболеваний и возможных противопоказаний [9, 31]. Особое значение придается комплексной оценке соотношения пользы и риска терапии, а также динамическому наблюдению за пациентками.

Таким образом, современные данные свидетельствуют о том, что состояние рецепторной системы может влиять на сосудистый ответ при применении менопаузальной гормональной терапии [10–12]. Вместе с тем МГТ не рассматривается как средство профилактики сердечно-сосудистых заболеваний и должна назначаться прежде всего для лечения менопаузальных симптомов после индивидуальной оценки показаний и противопоказаний [9, 28, 31]. Дальнейшее изучение ER α , ER β и GPER представляет интерес с точки зрения разработки новых селективных подходов к коррекции возрастных сосудистых изменений, однако клиническая эффективность подобных стратегий требует подтверждения в крупных независимых клинических исследованиях [13, 14, 25].

Ограничения современных исследований и перспективные направления дальнейших исследований. Несмотря на значительный прогресс в изучении роли рецепторов эстрогенов в регуляции сосудистой функции, многие аспекты их участия в процессах сосудистого старения остаются недостаточно изученными [10, 13]. Большинство имеющихся данных получено в экспериментальных исследованиях на клеточных культурах и животных моделях, тогда как результаты клинических исследований, непосредственно оценивающих изменения экспрессии и функциональной активности рецепторов эстрогенов у женщин в различные периоды менопаузы, остаются ограниченными [10, 25]. Это существенно затрудняет экстраполяцию экспериментальных результатов в клиническую практику.

Одним из основных ограничений современной литературы является выраженная неоднородность дизайна исследований. Различия в возрасте обследуемых женщин, длительности постменопаузального периода, наличии сопутствующих сердечно-сосудистых и метаболических заболеваний, а также используемых методах оценки сосудистой функции осложняют сопоставление полученных результатов [9, 12, 28]. Кроме того, большинство исследований рассматривает ER α , ER β и GPER изолированно, хотя в физиологических условиях они функционируют как взаимосвязанная система [6, 7, 13].

Недостаточно изученными остаются и молекулярные механизмы возрастных изменений рецепторов эстрогенов. Несмотря на накопленные данные о роли эпигенетических процессов, оксидативного стресса и хронического воспаления в нарушении эстрогеновой сигнализации, относительный вклад каждого из этих механизмов окончательно не определен [10, 19, 26]. Перспективным направлением является дальнейшее изучение регуляции экспрессии генов ESR1, ESR2 и GPER1, а также роли микроРНК и других эпигенетических факторов в возрастной перестройке рецепторной системы [26, 27].

Значительный интерес представляет разработка препаратов, основанных на селективной модуляции рецепторов эстрогенов. Наиболее перспективными направлениями считаются создание селективных агонистов GPER, тканеспецифических модуляторов ER α и ER β , а также препаратов, воздействующих на пострецепторные механизмы передачи сигнала [13, 14, 25]. Однако большинство подобных подходов пока находится на стадии экспериментального изучения, а их эффективность и безопас-

ность требуют подтверждения в крупных клинических исследованиях [13, 28, 31].

Перспективным направлением остается поиск биомаркеров, отражающих функциональное состояние рецепторной системы эстрогенов. Их использование может способствовать более точной оценке сердечно-сосудистого риска, прогнозированию сосудистого ответа на менопаузальную гормональную терапию у пациенток с показаниями к ее применению, а также выбору оптимальной лечебной тактики [12, 28]. Дополнительные возможности открывает интеграция молекулярно-генетических, эпигенетических и клинических данных в рамках концепции персонализированной медицины, что позволит разрабатывать индивидуализированные стратегии профилактики и лечения возраст-ассоциированных сердечно-сосудистых заболеваний [12, 28].

Таким образом, дальнейшее развитие фундаментальных и клинических исследований позволит уточнить роль рецепторов эстрогенов в механизмах сосудистого старения и оценить возможности их практического применения. Современные исследования постепенно смещают акцент с оценки уровня циркулирующих эстрогенов на изучение рецепторной чувствительности, межрецепторного взаимодействия и механизмов внутриклеточной передачи сигнала. Это создает предпосылки для разработки новых селективных терапевтических подходов, эффективность и безопасность которых должны быть подтверждены в дальнейших клинических исследованиях [10, 13, 18].

Заключение

Проведенный анализ современной отечественной и зарубежной литературы свидетельствует о том, что рецепторы эстрогенов являются важным звеном молекулярной регуляции сосудистой функции и обеспечивают реализацию большинства вазопротективных эффектов эстрогенов. Установлено, что согласованная активность ER α , ER β и GPER участвует в поддержании эндотелиальной функции, регуляции сосудистого тонуса, ограничении воспалительных реакций, контроле оксидативного стресса и процессов ремоделирования сосудистой стенки. Наиболее убедительные экспериментальные данные получены в отношении ER α , который играет ведущую роль в регуляции синтеза оксида азота и эндотелий-зависимой вазодилатации, тогда как ER β и GPER дополняют эти механизмы, участвуя в контроле воспалительных процессов, клеточной пролиферации и быстрых негеномных сосудистых реакций.

Имеющиеся данные позволяют предположить, что возрастное повышение сердечно-сосудистого риска у женщин после менопаузы связано не только со снижением концентрации циркулирующих эстрогенов, но и с изменениями рецепторной системы. Нарушение экспрессии рецепторов, снижение эффективности внутриклеточной передачи сигнала и изменение чувствительности сосудистой стенки к действию эстрогенов рассматриваются как возможные механизмы, способствующие развитию эндотелиальной дисфункции, хронического воспаления и сосудистого ремоделирования. Вместе с тем большинство сведений о возрастных изменениях ER β и GPER получено в экспериментальных исследованиях, тогда как их клиническое значение и выраженность у женщин в различные периоды постменопаузы требуют дальнейшего изучения.

Современные клинические исследования показывают, что результаты менопаузальной гормональной терапии зависят не только от времени ее назначения, но и от состояния сосудистой стенки и рецепторной системы. Это согласуется с концепцией «терапевтического окна», однако имеющиеся данные не позволяют рассматривать менопаузальную гормональную терапию как средство профилактики сердечно-сосудистых заболеваний. Решение о ее назначении должно приниматься индивидуально с учетом клинических показаний, факторов риска и возможных противопоказаний.

Перспективными направлениями дальнейших исследований представляются изучение молекулярных механизмов возрастных изменений рецепторов эстрогенов, уточнение роли эпигенетической регуляции их экспрессии, а также разработка селективных модификаторов ER α , ER β и GPER. Однако клиническая эффективность и безопасность подобных подходов в настоящее время окончательно не подтверждены и требуют проведения крупных проспективных исследований с участием женщин различных возрастных групп.

Таким образом, рецепторы эстрогенов следует рассматривать как важный компонент регуляции сосудистой функции и один из факторов, потенциально влияющих на процессы сосудистого старения. Дальнейшее изучение механизмов эстрогеновой сигнализации может способствовать совершенствованию представлений о возрастных изменениях сосудистой стенки и создать предпосылки для разработки новых персонализированных подходов к ведению женщин в постменопаузальном периоде.

Список литературы

1. Кобалава Ж. Д., Конради А. О., Недогода С. В., Шляхто Е. В., Арутюнов Г. П., Баранова Е. И., Барбараш О. Л., Бобкова Н. В., Бойцов С. А., Бубнова М. Г., Вавилова Т. В., Виллевалде С. В., Галевич А. С., Глезер М. Г., Гринева Е. Н., Гринштейн Ю. И., Драпкина О. М., Жернакова Ю. В., Звартау Н. Э., Иртюга Щ. Б., Кисляк О. А., Козиолова Н. А., Космачева Е. Д., Котовская Ю. В., Либис Р. А., Лопатин Ю. М., Небиеридзе Д. В., Недошивин А. О., Никулина С. Ю., Остроумова О. Д., Ощепкова Е. В., Ратова Л. Г., Саласюк Ф. С., Скибицкий В. В., Ткачева О. Н., Троицкая Е. А., Чазова И. Е., Чесникова Е. И., Чумакова Г. А., Шальнова С. А., Шестакова М. В., Якушин С. С., Янишевский С. Н. Артериальная гипертензия у взрослых. Клинические рекомендации 2024 // Российский кардиологический журнал. 2024. № 29 (9). С. 6117. DOI: 10.15829/1560-4071-2024-6117. EDN: GUEWLU.
2. Mahmood S. S., Levy D. H., Vasan R. S., Wang T. J. The Framingham Heart Study and the epidemiology of cardiovascular disease: a historical perspective // *The Lancet*. 2014. № 383 (9). С. 999–1008. DOI: 10.1016/S0140-6736(13)61752-3.
3. Newson L. Menopause and cardiovascular disease // *Post Reprod Health*. 2018. Vol. 24 (1). P. 44–49. DOI: 10.1177/2053369117749675.
4. Бойцов С. А., Драпкина О. М., Шляхто Е. В., Конради А. О., Баланова Ю. А., Жернакова Ю. В., Метельская В. А., Ощепкова Е. В., Ротарь О. П., Шальнова С. А. Исследование ЭССЕ-РФ (Эпидемиология сердечно-сосудистых заболеваний и их факторов риска в регионах Российской Федерации). Десять лет спустя // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2021. № 20 (5). С. 3007. DOI: 10.15829/1728-8800-2021-3007.
5. Muka T., Oliver-Williams C., Kunutsor S., Laven J. S. E., Fauser B. C. J. M., Chowdhury R., Kavousi M., Franco O. H. Association of Age at Onset of Menopause and Time Since Onset of Menopause With Cardiovascular Outcomes, Intermediate Vascular Traits, and All-Cause Mortality: A Systematic Review and Meta-analysis // *JAMA Cardiol*. 2016. Vol. 1 (7). P. 767–776. DOI: 10.1001/jamacardio.2016.2415.
6. Arnal J. F., Lenfant F., Metivier R., Flouriot G., Henrion D., Adlanmerini M., Fontaine C., Gourdy P., Chambon P., Katzenellenbogen B. S., Katzenellenbogen J. A. Membrane and Nuclear Estrogen Receptor Alpha Actions: From Tissue Specificity to Medical Implications // *Physiol Rev*. 2017. Vol. 97 (3). P. 1045–1087. DOI: 10.1152/physrev.00024.2016.
7. Fuentes N., Silveyra P. Estrogen receptor signaling mechanisms // *Adv Protein Chem Struct Biol*. 2019. № 116. С. 15–170. DOI: 10.1016/bs.apcsb.2019.01.001.
8. Rossouw J. E., Anderson G. L., Prentice R. L., LaCroix A. Z., Kooperberg C., Stefanick M. L., Jackson R. D., Beresford S. A. A., Howard B. V., Johnson K. C., Kotchen J. M., Ockene J. Writing Group for the Women's Health Initiative Investigators. Risks and benefits of estrogen plus progestin in healthy postmenopausal women: principal results From the Women's Health Initiative randomized controlled trial // *JAMA*. 2002. Vol. 288 (3). P. 321–333. DOI: 10.1001/jama.288.3.321.
9. Менопауза и климактерическое состояние у женщины. Клинические рекомендации // Акушерство и гинекология. 2025 (10, Приложение). DOI: 10.18565/aig.2025.301.
10. Davezac M., Buscato M., Zahreddine R., Lacolley P., Henrion D., Lenfant F., Fontaine C., Arnal J. F. Estrogen Receptor and Vascular Aging // *Front Aging*. 2021. Vol. 2. P. 727380. DOI: 10.3389/fragi.2021.727380.
11. Hodis H. N., Mack W. J., Henderson V. W., Shoupe D., Budoff M. J., Hwang-Levine J., Li Y., Feng M., Dustin L., Kono N., et al. Vascular Effects of Early versus Late Postmenopausal Treatment with Estradiol // *N Engl J Med*. 2016. Vol. 374 (1). P. 1221–1231. DOI: 10.1056/NEJMoa1505241.
12. D'Costa Z., Spertus E., Hingorany S., Patil R., Horwich T., Press M. C., Shah J., Watson K. E., Jafari L. Cardiovascular Risk Associated with Menopause and Menopause Hormone Therapy: A Review and Contemporary Approach to Risk

- Assessment // *Curr Atheroscler Rep.* 2025. Vol. 27 (1). P. 100. DOI: 10.1007/s11883-025-01343-6.
13. Arterburn J. B., Prossnitz E. R. G Protein-Coupled Estrogen Receptor GPER: Molecular Pharmacology and Therapeutic Applications // *Annu Rev Pharmacol Toxicol.* 2023. Vol. 63. P. 290–320. DOI: 10.1146/annurev-pharmtox-031122-121944.
14. Sengupta S., Jordan V. C. Selective Estrogen Modulators as an Anticancer Tool. In: Bernstein L. M., Santen R. J. (eds) *Innovative Endocrinology of Cancer // Advances in Experimental Medicine and Biology.* Vol. 630. Springer, New York, 2008. DOI: 10.1007/978-0-387-78818-0_13.
15. Marjollet J., Buscato M., Davezac M., Vessieres E., Gosset A., Adlanmerini M., Henrion D., Lenfant F., Arnal J.F., Fontaine C. Estrogen receptors and vascular aging // *Med Sci (Paris).* 2024 Oct. Vol. 40 (10). P. 729–736. DOI: 10.1051/medsci/2024115.
16. Page M. J., McKenzie J. E., Bossuyt P. M., et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews // *BMJ.* 2021. P. 372, n71. DOI: 10.1136/bmj.n71.
17. Moncada S., Higgs A. The L-arginine-nitric oxide pathway // *N Engl J Med.* 1993. Vol. 329 (2). P. 2002–2012. DOI: 10.1056/NEJM199312303292706.
18. Dama A., Baggio C., Boscaro C., Albiero M., Cignarella A. Estrogen Receptor Functions and Pathways at the Vascular Immune Interface // *Int J Mol Sci.* 2021. Vol. 22 (8). P. 4254. DOI: 10.3390/ijms22084254.
19. Ungvari Z., Tarantini S., Donato A. J., Galvan V., Csiszar A. Mechanisms of Vascular Aging // *Circ Res.* 2018. Vol. 123 (7). P. 849–867. DOI: 10.1161/CIRCRESAHA.118.311378.
20. Townsend R. R., Wilkinson I. B., Schiffrin E. L., Avolio A. P., Chirinos J. A., Cockcroft J. R., Heffernan K. S., Lakatta E. G., McEniery C. M., Mitchell G. F., et al. Recommendations for Improving and Standardizing Vascular Research on Arterial Stiffness: A Scientific Statement From the American Heart Association // *Hypertension.* 2015. Vol. 66 (3). P. 698–722. DOI: 10.1161/HYP.0000000000000033.
21. Campisi J., d’Adda di Fagagna F. Cellular Senescence: When Bad Things Happen to Good Cells // *Nat Rev Mol Cell Biol.* 2007. Vol. 8 (9). P. 729–740. DOI: 10.1038/nrm2233.
22. Chambliss K. L., Shaul P. W. Estrogen modulation of endothelial nitric oxide synthase // *Endocr Rev.* 2002. Vol. 23 (5). P. 665–686. DOI: 10.1210/er.2001-0045.
23. Zimmerman M. A., Budish R. A., Kashyap S., Lindsey S. H. GPER-novel membrane oestrogen receptor // *Clin Sci (Lond).* 2016. Vol. 130 (12). P. 1005–1016. DOI: 10.1042/CS20160049.
24. Zahreddine R., Davezac M., Smirnova N., Buscato M., Lhuillier E., Lupieri A., Solinhac R., Vinel A., Vessieres E., Henrion D., Renault M. A., Gadeau A. P., Flouriot G., Lenfant F., Laffargue M., Métivier R., Arnal J. F., Fontaine C. Tamoxifen Accelerates Endothelial Healing by Targeting ERα in Smooth Muscle Cells // *Circ Res.* 2020 Dec 4. Vol. 127 (12). P. 1473–1487. DOI: 10.1161/CIRCRESAHA.120.317062. PMID: 33012251.
25. Barton M., Filardo E. J., Lolait S. J., Thomas P., Maggiolini M., Prossnitz E. R. Twenty years of the G protein-coupled estrogen receptor GPER: Historical and personal perspectives // *J Steroid Biochem Mol Biol.* 2018. Vol. 176. P. 4–15. DOI: 10.1016/j.jsbmb.2017.03.021.
26. Gardini E. S., Chen G. G., Fiacco S., Mernone L., Willi J., Turecki G., Ehler U. Differential ESR1 Promoter Methylation in the Peripheral Blood—Findings from the Women 40+ Healthy Aging Study // *Int J Mol Sci.* 2020. Vol. 21 (10). P. 3654. DOI: 10.3390/ijms21103654.
27. Pérez-Cremades D., Mompeón A., Vidal-Gómez X., Hermenegildo C., Novella S. miRNA as a New Regulatory Mechanism of Estrogen Vascular Action // *Int J Mol Sci.* 2018. Vol. 19 (2). P. 473. DOI: 10.3390/ijms19020473.
28. Kim Y., Cho M. K., Chung Y. J., Hong S. H., Hwang K. R., Jeon G. H., Joo J. K., Kim S. K., Lee D. O., et al. The 2025 Menopausal Hormone Therapy Guidelines // *J Menopausal Med.* 2025. Vol. 31 (2). P. 53–84. DOI: 10.6118/jmm.25103.
29. Manson J. E., Aragaki A. K., Rossouw J. E., Anderson G. L., Prentice R. L., LaCroix A. Z., Chlebowski R. T., Howard B. V., Thomson C. A., Margolis K. L., et al. Menopausal Hormone Therapy and Long-term All-Cause and Cause-Specific Mortality: The Women’s Health Initiative Randomized Trials // *JAMA.* 2017. Vol. 318 (10). P. 927–938. DOI: 10.1001/jama.2017.11217.
30. Céline Gérard, Jean-Michel Foidart. Estetrol: From Preclinical to Clinical Pharmacology and Advances in the Understanding of the Molecular Mechanism of Action // *Drugs in R&D.* 2023. Vol. 23. P. 77–92. DOI: 10.1007/s40268-023-00419-5.
31. Sukhikh G. T., Serov V. N., Shlyakhto E. V., Dedov I. I., Arutyunov G. P., Tkacheva O. N., et al. Menopausal hormone therapy in patients with cardiovascular and metabolic diseases: an interdisciplinary Delphi consensus among Russian gynecologists, cardiologists, endocrinologists, gerontologists and geriatricians, phlebologists, and clinical pharmacologists // *Ter Arkh.* 2026. Vol. 98 (1). P. 6–27. DOI: 10.26442/00403660.2026.01.203470.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

СТАТЬЯ

УДК 631.58(571.52)



CC BY 4.0

ЗОНАЛЬНАЯ СИСТЕМА ЗЕМЛЕДЕЛИЯ РЕСПУБЛИКИ ТЫВА**Кузьмина Е. Е. ORCID ID 0000-0003-3209-1288,****Донгак М. М.**

*Тувинский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
«Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук»,
Кызыл, Российская Федерация, e-mail: tuva@sfsca.ru*

Жесткие гидротермические условия Республики Тыва, изменяющиеся социально-экономические условия, появление новых средств химизации, сельскохозяйственной техники нового поколения, современных технологий в сельском хозяйстве обусловили необходимость актуализации руководства «Зональные системы земледелия Тувинской АССР» изданной в 1982 году. Цель исследований – основываясь на результатах проведенных научно-исследовательских работ, разработать Зональную систему земледелия Республики Тыва, обеспечивающую эффективное использование земли и увеличение производства высококачественной сельскохозяйственной продукции. Зональная система земледелия Республики Тыва разработана Тувинским НИ-ИСХ – филиалом СФНЦА РАН на основе результатов проведенных многолетних исследований, всестороннего анализа состояния данной отрасли и перспектив развития системы земледелия с учетом природно-климатических и социально-экономических факторов. При проведении работы был выполнен анализ современного состояния земледелия и растениеводства Республики Тыва, выявлена специфика системы ведения земледелия в экстремальных природно-климатических условиях региона, проведены научно-производственные исследования по применению удобрений и возделыванию зерновых и кормовых культур в различных почвенно-климатических зонах Тувы. Система земледелия состоит из 10 ключевых разделов, которые включают детальное описание агроэкологии, вопросы использования наиболее оптимальных севооборотов, способов обработки земель, проведение мелиоративных работ, защиты сельскохозяйственных культур от вредителей и болезней. Особое внимание уделено системе внесения удобрений, технологиям выращивания зерновых культур, картофеля, овощных культур и организации кормопроизводства. Внедрение данной системы земледелия будет способствовать интенсивному развитию отрасли растениеводства в Республике Тыва, в том числе увеличению урожайности зерновых культур и, как следствие, росту рентабельности производства, повышению конкурентоспособности и доходности сельского хозяйства, а также укреплению продовольственной безопасности региона.

Ключевые слова: Республика Тыва, зональная система земледелия, технология, растениеводство, урожайность, почвы, кормопроизводство, севообороты, удобрения

ZONAL AGRICULTURAL SYSTEM OF THE REPUBLIC OF TUVA**Kuzmina E. E. ORCID ID 0000-0003-3209-1288,****Dongak M. M.**

*Tuvinian Scientific Research Institute of Agriculture – branch
Federal State Budgetary Institution of Science "Siberian Federal Scientific Center
for Agrobiotechnology of the Russian Academy of Sciences",
Kyzyl, Russian Federation, e-mail: tuva@sfsca.ru*

The harsh hydrothermal conditions of the Republic Tuva, changing socio-economic conditions, the emergence of new chemical inputs, new-generation agricultural machinery, and modern technologies in agriculture have necessitated the updating of the manual «Zonal Farming Systems of the Tuvan ASSR» published in 1982. Goal of the research is to develop a Zonal Farming System for the Republic Tuva, based on the results of the conducted research work, which will ensure the efficient use of land and an increase in the production of high-quality agricultural products. Zonal farming system of the Republic Tuva was developed by the Tuva Research Institute of Agriculture, a branch of the Siberian Federal Scientific Center of agrobiotechnologies of the Russian Academy of Sciences – based on the results of long-term research, a comprehensive analysis of the state of this sector, and the prospects for the development of the farming system, taking into account natural, climatic, and socio-economic factors. During the work, an analysis was carried out of the current state of agriculture and crop production in the Republic Tuva, the specifics of the farming system in the regions extreme natural and climatic conditions were identified, and scientific and production studies were conducted on the use of fertilizers and the cultivation of grain and forage crops in various soil and climatic zones of Tuva. Farming system consists of 10 key sections, which include a detailed description of agroecology, issues related to the use of the most optimal crop rotations, land cultivation methods, land reclamation work, and the protection of agricultural crops from pests and diseases. Special attention is paid to the system of fertilizer application, technologies for growing grain crops, potatoes, vegetable crops, and the organization of feed production. Implementation of this farming system will contribute to the intensive development of the crop production sector in the Republic Tuva, including an increase in grain crop yields, and, as a result, to an increase in production profitability, an improvement in the competitiveness and profitability of agriculture, as well as to strengthening the regions food security.

Keywords: Republic Tuva, zonal farming system, technology, crop production, yield, soil fertility, fodder production, crop rotations, fertilizers

Введение

Для того, чтобы получить высокие урожаи сельскохозяйственных культур в условиях Республики Тыва, необходимо приложить максимум усилий, кроме того, необходим научный подход, так как регион относится к зоне рискованного земледелия [1; 2]. Прежде всего, следует отметить резко континентальный характер природно-климатических условий [3-5]. Также республика характеризуется низким естественным плодородием почв. Доля наиболее плодородных черноземных и серых лесных почв из всех земель составляет менее 20%, а 80% пашни находится в сухостепной и степной зонах. В структуре пахотных земель в регионе преобладают каштановые почвы (69%), черноземы составляют 25% [6-8]. На низком уровне находится и агроклиматический ресурс в целом. Если в среднем по России его принять за единицу, в Сибири он составляет 0,52...0,58, а в Республике Тыва – лишь 0,46...0,48 [9]. Несмотря на сложные природно-климатические условия республики и животноводческую направленность сельскохозяйственной отрасли, в Туве земледелие и растениеводство всегда являлись одними из основных отраслей АПК. Интенсивное развитие отрасли растениеводства получила во времена Тувинской автономной области и Тувинской АССР: наибольшая посевная площадь достигала 370,7 тыс. га (в 1980 г.), посевы зерновых культур – 245,5 тыс. га в 1980 г., а кормовых культур – 125,5 тыс. га в 1985 г. [10-12]. Согласно данным Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Тыва и Красноярскстата, в 2025 году общая посевная площадь в республике составила лишь 30,41 тыс. га, из которых 21,01 тыс. га приходилось на кормовые культуры [13]. Вместе с тем в Республике Тыва имеются достаточные возможности для интенсивного развития растениеводства при условии рационального использования земли с учетом особенностей отдельных районов региона [14-15].

В 1982 году Тувинской государственной сельскохозяйственной опытной станцией совместно с министерством сельского хозяйства Тувинской АССР было подготовлено издание «Зональные системы земледелия Тувинской АССР» с учетом актуальных на тот момент технико-технологических и социально-экономических условий [16]. За более чем сорокалетний период с момента внедрения в практику вышеназванной разработки произошли значительные изменения организационных форм хозяйствования, созданы новые сорта, высоко-

технологичная техника и оборудование, эффективные удобрения и средства защиты растений, разработано большое количество новых технологий. Со времени разработки предыдущей зональной системы земледелия в Республике Тыва отмечены изменения не только состояния почв, но и климатических условий. По имеющимся у нас данным, сумма активных температур увеличилась в степной зоне на 150 °С, в лесостепной – на 450 °С, годовая сумма осадков увеличилась в среднем в степной зоне на 20 мм, в лесостепной – на 100 мм, при этом высота снежного покрова уменьшилась на 5 см. В связи с этим величина гидротермического коэффициента в лесостепной зоне снизилась с 1,3 до 1,1. Все эти изменения явились предпосылкой к проведению работы по формированию научной основы ведения отрасли растениеводства в современных условиях Республики Тыва.

Цель исследований – основной целью проводимой работы по разработке новой «Зональной системы земледелия Республики Тыва» являлась разработка комплекса взаимосвязанных организационно-экономических, агротехнических, мелиоративных, почвозащитных мероприятий, направленных на эффективное использование земли, агроклиматических ресурсов, биологического потенциала растений, на повышение плодородия почв с целью получения экономически целесообразных урожаев сельскохозяйственных культур в природно-климатических и экономических условиях Республики Тыва.

Исходя из вышеизложенного поставлены следующие задачи:

- провести анализ природных ресурсов Республики Тыва, физико-географических и агроэкологических условий;
- осуществить агроэкологическую оценку земель (природно-сельскохозяйственное районирование, агроэкологическая оценка почв и сельскохозяйственных культур);
- спроектировать адаптивно-ландшафтные системы земледелия и региональные агротехнологии.

Материалы и методы исследования

Работа по разработке Зональной системы земледелия Республики Тыва выполнена в Тувинском НИИСХ-филиале СФНЦА РАН. Были использованы доступные для изучения и анализа статистические материалы Федеральной службы государственной статистики, Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Тыва, результаты многолетних исследований ученых Тувинского НИИСХ по селекции и семеноводству, кормопроизводству, зем-

леделию, выполненных согласно методике полевого опыта, методическим указаниям по проведению опытов с кормовыми культурами, методике Государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур [17-19].

Результаты исследований и их обсуждение

«Зональная система земледелия Республики Тыва» включает в себя 10 разделов.

Первый раздел «Агроэкологическая характеристика и природное районирование сельскохозяйственных территорий» содержит описание природно-климатических условий сельскохозяйственных районов Тувы (климат, рельеф, почвы). Включает сведения об агрохимических свойствах разных типов почвы, встречающихся на территории Республики Тыва, агроэкологическую характеристику важнейших зерновых культур, возделываемых в Туве (начало прорастания семян, продолжительность вегетационного периода, температура, при которой растения повреждаются заморозками, сумма активных температур).

Выращивание зерновых и кормовых культур в Республике Тыва с учетом почвенно-климатических условий целесообразно в лесостепной и степной зонах районов центральной зоны: Каа-Хемском, Кызылском, Пий-Хемском, Тандинском, Улуг-Хемском, Чеди-Хольском, Чаа-Хольском. В условиях орошения возможно возделывание сельскохозяйственных культур в Бай-Тайгинском, Барун-Хемчикском, Сут-Хольском, Дзун-Хемчикском кожуунах. В Монгун-Тайгинском кожууне основными являются однолетние культуры на зеленый корм. Возможности земледелия ограничены небольшими размерами пахотнопригодных угодий в таких кожуунах, как Тес-Хемский, Овюрский, Эрзинский. В Тоджинском и Тере-Хольском административных районах из-за особенностей температурного режима возделывание сельскохозяйственных культур крайне ограничено.

Во втором разделе внимание уделено севооборотам. В данном разделе приведена классификация севооборотов, характеристика предшественников сельскохозяйственных культур, представлены схемы севооборотов для разных агроэкологических зон республики, основные принципы проектирования севооборотов.

С учетом почвенно-климатических особенностей республики в степной зоне могут быть рекомендованы схемы севооборотов с короткой ротацией и обязательно с полями чистых паров (зернопаровые трехпольные), размещенных по полосам (схема

севооборотов располагается не по полям, а по полосам поперек господствующих ветров шириной в 75-100-150 метров, в зависимости от степени эродированности). В сухостепной зоне рекомендуются зернопаровые двухпольные севообороты с полями чистых паров.

В системе мер, направленных на повышение урожайности сельскохозяйственных культур и борьбу с эрозией почв, важное место принадлежит обработке почвы, которая в условиях земледелия Республики Тыва должна быть нацелена на влаго- и почвосбережение, уменьшение или полное уничтожение сорной растительности. В третьем разделе зональной системы представлены основные виды обработки полей: система зяблевой, или основной обработки почвы, весновспашка, предпосевная подготовка почвы, система паровой обработки почвы, система обработки занятых паров и зяби с описанием всех необходимых технологических процессов и рекомендуемых технических средств.

Мелиорация земель в суровых климатических условиях Республики Тыва представляет собой необходимую меру для преобразования природных комплексов и восстановления деградированных земель с целью их превращения в продуктивные сельскохозяйственные угодья. Успех орошаемого земледелия в значительной мере определяется техническим состоянием и степенью эффективности эксплуатации систем орошения.

Орошение полей является одним из наиболее распространенных видов мелиорации земель. В Республике Тыва имеется 49 оросительных систем с общей площадью орошения 33,3 тыс. га [20]. В четвертом разделе «Система земледелия на орошаемых землях» раскрываются особенности структуры посевных площадей, обработки почвы, защиты почвы от водной эрозии.

С целью повышения продуктивности и эффективности использования орошаемых участков в условиях Республики Тыва рекомендуются севообороты с многолетними травами (главным образом с люцерной), сидеральными, поукосными и пожнивными промежуточными культурами. Обработка почвы в системе земледелия на орошаемых землях должна способствовать устранению отрицательных последствий поливов, улучшать ее водно-физические свойства, и в целом плодородие.

Пятый раздел «Система защиты растений» включает два подраздела: «Сорные растения и меры борьбы с ними» и «Меры борьбы с болезнями и вредителями зерновых культур».

В настоящее время на сельхозугодиях республики активно распространились многолетние и однолетние сорняки, такие как пырей ползучий, осот полевой, молочай, просо дикое, щетинник зеленый и сизый, наблюдается распространение ковыля Крылова. Борьба с сорными растениями – это одна из сложных задач, стоящих перед сельхозтоваропроизводителями. В данной работе перечислены виды сорных растений и описаны агротехнические, биологические и химические методы борьбы с сорняками, основные болезни и вредители зерновых культур и указаны методы борьбы с ними.

Агрохимическая характеристика почв сельскохозяйственных угодий и рекомендации по применению минеральных (азотных, фосфорных, калийных) и органических удобрений представлены в шестом разделе.

Пахотные земли республики в основном легкого механического состава. По данным ФГБУ ГСАС «Тувинская», 76% площади пашни имеют низкое содержание гумуса в почве, 19,5% среднее, 4,5% высокое. Среднюю обеспеченность фосфором имеют 35% площади пашни, 18,6% высокую, 46,4% низкую. Почвы с низким запасом обменного калия занимают 63,3% пахотных земель, 27,3% почв среднеобеспечены, 9,4% высокообеспечены. Удобрения в первую очередь вносятся под наиболее рентабельные сельскохозяйственные культуры, которые характеризуются высокой отзывчивостью на внесение минеральных или органических удобрений. Систему удобрений необходимо подбирать индивидуально для каждого хозяйства, учитывая состояние почвы, виды возделываемых культур, влаго- и теплообеспеченность вегетационного периода, которые также оказывают значительное влияние на потребление минеральных веществ растениями из почвы, что очень актуально в условиях засушливого климата Республики Тыва. Для более эффективной отдачи с единицы посевной площади нужно увеличить долю сидеральных паров, используя в качестве парозанимающих культур донник, рапс, бобовые, гречиху при весенних посевах и летней их запашке. А также увеличить долю однолетних (горох, вика, кормовые бобы, соя) и многолетних (донник, клевер, люцерна, галега, эспарцет) бобовых культур.

Следующий, седьмой раздел, посвящен возделыванию зерновых культур в условиях нашей республики. Дана характеристика основных зерновых культур, возделываемых в республике с описанием сортов, допущенных к использованию на территории республики. Из общего сортимента воз-

делываемых в республике сельскохозяйственных культур наибольшее распространение по зонам республики имеют яровая пшеница, ячмень и овес. Среди зерновых культур в республике ведущее место отводится яровой пшенице, ее посевы можно размещать в степных и лесостепных зонах, а раннеспелые сорта в подтаежной зоне. В северных подтаежных и лесостепных зонах значительные массивы посевных площадей отводятся под овес, занимающий второе место после пшеницы благодаря повышенной устойчивости к недостатку тепла и избытку влаги во влажные годы. Приведены технологические схемы возделывания яровой пшеницы, ячменя и овса в разных агроэкологических зонах и по разным предшественникам с подробным указанием всех требований, агротехнических сроков, технологических процессов и технических средств.

Тыва – республика животноводческая. Повышение продуктивности животноводства напрямую зависит от состояния кормовой базы, прежде всего от структуры кормопроизводства и адаптивного подбора видов и сортов кормовых культур [21; 22]. Поэтому в зональной системе земледелия много внимания отведено разделу «Кормопроизводство» (восьмой раздел). Даны описание кормовых севооборотов, системы защиты растений в кормопроизводстве, подбор травосмесей для создания сенокосов и пастбищ, коренное улучшение сенокосов и пастбищ, сенокосные и пастбищные конвейеры, зеленый конвейер для МТФ, характеристика основных кормовых и зернофуражных культур. Перечислены сорта кормовых культур, адаптированные для условий нашей республики. Представлены основные технологические схемы возделывания однолетних и многолетних трав, заготовка кормов (сено, сенаж, сенаж в упаковке) и сетевой график возделывания кормовых культур по основным земледельческим районам региона. Отдельное внимание уделено семеноводству кормовых культур.

В Республике Тыва, по сложившейся зональной специализации, производство картофеля сосредоточено в лесостепной подзоне центральной зоны, где в наличии запасы водных ресурсов, лучшие климатические условия и земельные ресурсы, что влияет на показатели урожайности и себестоимости продукции картофелеводства. В системе земледелия, в девятом разделе, подробно раскрыты требования к условиям произрастания картофеля: элементы питания, место в севообороте, минеральные и органические удобрения, дозы и сроки внесения,

технология производства (посадка, уход, уборка, хранение), первичное семеноводство, болезни и вредители картофеля, препараты для борьбы с ними, перечислены сорта, рекомендованные для возделывания в нашей республике.

Десятый раздел посвящен развитию овощеводства в условиях Республики Тыва. Для развития овощеводства на территории республики наибольшее значение имеют лесостепная и степная зоны, к которым относятся центральная подтаежно-степная зона (Каа-Хемский, Кызылский, Пий-Хемский, Тандинский, Улуг-Хемский кожууны) и западная сухостепная зона (Бай-Тайгинский, Барун-Хемчикский, Сут-Хольский, Дзун-Хемчикский кожууны). Почвы степных котловин, используемых в производстве, представлены маломощными южными черноземами, а также темно-каштановыми и серыми лесными легкого механического состава – легкосуглинистые и супесчаные. Содержание гумуса составляет от 2,0 до 8,7%, поэтому важными мероприятиями для получения высоких и устойчивых урожаев овощей на этих почвах являются накопление и сохранение влаги и внесение удобрений. Описаны сроки посева и нормы высева основных овощных культур. Перечислены сорта, районированные для 11-го региона. Дана краткая технологическая схема возделывания овощей и нормы орошения.

Заключение

Реализация инновационной стратегии развития земледелия Республики Тыва предусматривает применение в конкретных природных и экономических условиях республики более совершенных технологий производства и переработки сельскохозяйственной продукции, улучшенных сортов сельскохозяйственных культур, а также освоение в сельскохозяйственных организациях разных форм собственности научных систем ведения производства, эффективное хозяйствование, включая его производственные, экономические и экологические результаты. Хозяйства, использующие современные научно-технические достижения, имеют результаты, как минимум в 1,5-2 раза превышающие средние показатели.

Разработанная Зональная система земледелия Республики Тыва, включающая рекомендации и нормативные материалы по освоению научных схем производства продукции растениеводства в конкретных условиях с учетом влияния природно-климатических и социально-экономических факторов, будет являться основой перспек-

тивных программ развития сельскохозяйственных предприятий Республики Тыва и определять пути выполнения поставленных ими задач.

Список литературы

1. Ламажап Р. Р., Липшин А. Г. Влияние климатических условий на урожайность ярового ячменя в Республике Тыва // Вестник КрасГАУ. 2016. № 12(123). С. 13-19. URL: <https://vestnik.kgau.ru/ru/nauka/article/79553/view> (дата обращения: 04.09.2026).
2. Донгак М.С.М. Влияние гидротермического режима на урожайность яровой пшеницы в условиях Республики Тыва // Вестник КрасГАУ. 2024. № 10(211). С. 10-15. URL: <https://vestnik.kgau.ru/ru/nauka/article/90848/view> (дата обращения: 04.09.2026). DOI: 10.36718/1819-4036-2024-10-10-15.
3. Ховалыг А. О., Кара-Сал А. М. Анализ расчетных показателей климатических условий Республики Тыва // Вестник Тувинского государственного университета. Естественные и сельскохозяйственные науки. 2024. № 3(7). С. 20-31. URL: <https://vestnik.tvsu.ru/index.php/natural-agricultural/issue/view/26/26> (дата обращения: 04.09.2026). DOI:10.24411/2221-0458-2024-03-20-31.
4. Канзываа С. О., Сат А. Э., Хуурак А. В. Динамика климата в Республике Тыва за 2010–2020 гг. // Молодой ученый. 2021. № 5(374). С. 237-240. URL: <https://moluch.ru/archive/347/78114> (дата обращения: 04.09.2026).
5. Куулар Х. Б. Региональные климатические изменения в Республике Тыва // Материалы Международной конференции «ИнтерКарто. ИнтерГИС». 2017. № 23(1). С. 205–209. URL: <http://intercarto.msu.ru/jour/data/x5/article491.pdf> (дата обращения: 04.09.2026). DOI: 10.24057/2414-9179-2017-1-23-205-209.
6. Жуланова В. Н. Эколого-хозяйственная оценка пахотных почв // Аграрный вестник Урала. 2016. № 6(148). С. 28-33. URL: <https://agvu.urgau.ru/ru/19-joomla/968-v-n-zhulanova-ekologo-khozyajstvennaya-otsenka-pakhotnykh-pochv.html> (дата обращения: 04.09.2026).
7. Жуланова В. Н. Современное гумусовое состояние агропочв Тувы // Эпоха науки. 2016. № 5. С. 79-82. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennoe-gumusovoe-sostoyanie-agropochv-tuvy/viewer> (дата обращения: 04.09.2026).
8. Гуркова Е. А., Соколов Д. А. Влияние гранулометрического состава на гумусонакопление в почвах сухих степей Тувы // Почвоведение. 2022. № 1. С. 106-118. URL: <https://sciencejournals.ru/view/article/?j=pochved&y=2022&v=0&n=1&a=Pochved2201006Gurkova&ysclid=mtmpe2hb id207882216> (дата обращения: 04.09.2026). DOI: 10.31857/S0032180X22010063.
9. Гончаров П. Л. О стабилизации растениеводства в Сибири // Достижения науки и техники АПК. 2007. № 12. С. 6-9. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_10304021_17355019.pdf (дата обращения: 06.09.2026).
10. Самбуу А. Д., Дабиев Д. Ф., Монгуш Ш. В., Монгуш Б. С. Подъем и упадок аграрных угодий Республики Тыва в XX и XXI вв. // Почвоведение и агрохимия. 2020. № 3. С. 94-108. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/podem-i-upadok-agrarnyh-ugodiy-respubliki-tyva-v-xx-i-xxi-vv/viewer> (дата обращения: 04.09.2026).
11. Самбуу А. Д., Дабиев Д. Ф., Аюнова О. Д., Чульдун А. Ф. Динамика аграрных угодий Республики Тыва с 1890 по 2019 гг. // Экосистемы центральной Азии: исследование, сохранение, рациональное использование Материалы XV Убсунурского международного симпозиума / Под редакцией Ч. Н. Самбыла. Красноярск. 2020. С. 34-44. URL: https://www.researchgate.net/publication/350276304_Dinamika_agrarnyh_ugodij_Respubliki_Tyva_s_1890_po_2019_gg (дата обращения: 04.09.2026).
12. Ковалева Ю. П., Монгуш С. В. Проблемы современного сельскохозяйственного землепользования в Республике Тыва // Столыпинский вестник. 2023. № 1. С. 489-496. URL:

<https://stolypin-vestnik.ru/wp-content/uploads/2023/01/53.pdf> (дата обращения: 04.09.2026).

13. Республика Тыва в цифрах 2025: Стат. сб. / Красноярскстат. Красноярск, 2026. 157 с. URL: <https://24.rosstat.gov.ru/folder/45814> (дата обращения: 06.09.2026).

14. Монгуш Б. С. Эффективность использования сельскохозяйственных угодий Республики Тыва // Экономика и бизнес: теория и практика. 2017. № 10(32). С. 91-94. URL: <http://economyandbusiness.ru/effektivnost-ispolzovaniya-selskohozyajstvennyh-ugodij-respubliki-tyva> (дата обращения: 04.09.2026).

15. Sambuu A., Golubyatnikov L. Analysis of the dynamics of agricultural lands of the Republic of Tyva using satellite images // E3S Web of Conferences – 2024. Vol. 539. Article 01021. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2024/69/e3sconf_rseiii2024_01021.pdf (дата обращения: 04.09.2026). DOI: 10.1051/e3sconf/202453901021.

16. Зональные системы земледелия Республики Тыва / отв. за выпуск Ларионов Г. И., Барышников В. А. // Сибирское отделение ВАСХНИЛ, 1982. 182 с.

17. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта: с основами статистической обработки результатов исследования. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

18. Методические указания по проведению опытов с кормовыми культурами. М.: ВНИИ кормов им. В.Р. Вильямса, 1987. 82 с.

19. Методика Государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Вып. 2. М., 1989. 194 с.

20. Республика Тыва. Правительство Республики Тыва. Распоряжение Об утверждении плана мероприятий («дорожной карты») по развитию мелиоративного комплекса на территории Республики Тыва на 2024-2026 годы от 2 февраля 2024 г. № 50-р // Официальный портал Республики Тыва. URL: <https://npa.rtyva.ru/upload/gov-orders/2024/02/520.58%20КБ.pdf> (дата обращения: 06.09.26).

21. Монгуш Л. Т. Кормовые угодья как основа развития животноводства Республики Тыва // Вестник КрасГАУ. 2022. № 8(185). С. 142-148. URL: <https://vestnik.kgau.ru/ru/nauka/article/115669/view> (дата обращения: 04.09.2026). DOI: 10.36718/1819-4036-2022-8-142-148.

22. Кузьмина Е. Е., Самбу-Хоо Ч. С., Монгуш Л. Т. Зональная специализация животноводства Республики Тыва // Вестник КрасГАУ. 2022. № 12. С. 70-76. URL: <https://vestnik.kgau.ru/ru/nauka/article/94116/view> (дата обращения: 04.09.2026). DOI: 10.36718/1819-4036-2022-12-70-76.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Финансирование осуществлялось за счет государственного контракта №2019.325869 «Выполнение работ по разработке зональной системы земледелия Республики Тыва для нужд Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Тыва».

Financing: The funding was provided under government contract No. 2019.225869 “Carrying out work to develop a zonal farming system for the Republic of Tuva for the needs of the Ministry of Agriculture and Food of the Republic of Tuva”.



ТРЕХМЕРНАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ И МУЛЬТИМОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДНИЩА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Белкин Е. Н. ORCID ID 0009-0007-5848-5433

*Акционерное общество «АЛГОНТ», Калуга, Российская Федерация,
e-mail: belkinen@algont.ru*

При досмотре днища нужно отличать посторонний предмет от штатного рельефа, несмотря на загрязнение, затенение и перемещение узлов подвески. Обзор посвящен выбору технологий, которые позволяют дополнить изображение метрическими данными и использовать их для обнаружения изменений. Библиографическая база обзора включает 46 научных публикаций 1992–2026 гг. Методы сопоставлены по принципу измерения, размерности данных, доступности поверхности для наблюдения и условиям эксплуатации. Рассмотрены стереоскопия, структурированный свет, лазерная триангуляция, времяпролетные и радиолокационные датчики, дополнительные оптические и тепловые каналы. Анализ охватывает также совмещение облаков точек, формирование доверенного эталона и поиск аномалий. Отдельно разобрано ограничение напольной съемки: один ракурс описывает только видимые поверхности, а не полную геометрию днища. Для стационарного прототипа предложено сочетать несколько лазерных профилометров с линейной RGB/NIR-съемкой и измерением скорости. Радар и тепловизор отнесены к подтверждающим каналам. Составлены классификация представлений и матрица применимости датчиков, определены принципы сравнения с эталоном и показатели натурных испытаний. Дальнейшие исследования связаны с созданием профильного открытого набора данных, оценкой наблюдаемости, компенсацией движения подвески и регламентированным обновлением эталона.

Ключевые слова: автоматизированный досмотр, днище транспортного средства, трехмерная реконструкция, лазерная профилометрия, мультимодальный анализ, обнаружение аномалий, цифровой эталон, UVIS

THREE-DIMENSIONAL RECONSTRUCTION AND MULTIMODAL ANALYSIS OF VEHICLE UNDERCARRIAGES

Belkin E. N. ORCID ID 0009-0007-5848-5433

ALGONT Joint Stock Company, Kaluga, Russian Federation, e-mail: belkinen@algont.ru

Undercarriage inspection must distinguish foreign objects from normal structural relief despite contamination, occlusion and suspension movement. This review examines how inspection systems can combine images with metric data to detect such changes. The review draws on 46 scholarly publications from 1992 to 2026. The methods were compared by measurement principle, data dimensionality, surface observability and operating conditions. The review covers stereoscopy, structured light, laser triangulation, time-of-flight and radar sensors, and additional optical and thermal channels. It also examines point-cloud registration, trusted-reference construction and anomaly detection. Particular attention is given to a limitation of floor-mounted scanning: a single viewpoint captures visible surfaces rather than the complete undercarriage geometry. A stationary prototype is proposed that combines several laser profilers with RGB/NIR line-scan imaging and speed measurement. Radar and thermal imaging are assigned corroborative roles. The review provides a classification of data representations and a sensor applicability matrix, together with principles for reference-based comparison and field-test metrics. Further work concerns a dedicated open dataset, quantitative observability assessment, compensation for suspension movement and controlled reference updating.

Keywords: automated inspection, vehicle undercarriage, three-dimensional reconstruction, laser profiling, multimodal analysis, anomaly detection, digital reference, UVIS

Введение

На автомобильном пропускном пункте днище осматривают прежде всего для поиска посторонних предметов. В железнодорожном транспорте к этой задаче добавляется контроль тележек, тормозов, кабельных трасс и другого подвагонного оборудования. Охранный досмотр и диагностика используют сходные средства наблюдения, но отвечают на разные вопросы. Ранние цифровые системы заменили ручное зерка-

ло панорамой из последовательных кадров или строк изображения [1]. Осмотр стал более воспроизводимым, однако глубину такая панорама не измеряет. Изменение траектории или освещения меняет вид одних и тех же деталей, а по двумерной проекции не всегда удастся отличить наложенный предмет от штатного рельефа.

Попытки дополнить подкузовную съемку дальнометрией предпринимались уже в начале 2000-х гг. В роботизированной

системе [2] геометрические данные, цвет и показания других сенсоров были объединены в общей модели сцены. Для досмотрового комплекса трудность заключается в условиях измерения: датчик находится близко к объекту, детали перекрывают друг друга, а темные покрытия соседствуют с зеркальными поверхностями. Вода, снег, грязь и вибрация дополнительно ухудшают съемку. При этом положение элементов подвески меняется даже у исправного транспорта. Промышленную 3D-метрологию приходится адаптировать к такому объекту; установка лидара вместо камеры сама по себе задачи не решает.

В путевых системах машинного зрения исследованы контроль силовой рамы грузового вагона [3], поиск посторонних предметов под скоростным поездом [4], сегментация и классификация деталей тележки [5]. Отдельные работы посвящены прослеживанию этих деталей в видеопоследовательности [6]. Обзоры [7, 8] описывают развитие многосенсорного мониторинга, накопление истории конкретного вагона и переход к предиктивной диагностике. Классификация транспортных систем технического зрения [9] связывает полноту наблюдения с сочетанием обычных и стереокамер, лазерных и радиолокационных датчиков, их размещением и направлением обзора. Вместе с тем сравнивать опубликованные результаты трудно: различаются условия съемки, наборы дефектов, разметка и метрики [10]. При выборе средств охранного досмотра приходится учитывать ту же неоднородность данных.

Литература по этой теме разделена между несколькими направлениями. В подвагонном наблюдении преобладает двумерное распознавание деталей, в 3D-метрологии рассматриваются главным образом контролируемые промышленные объекты, а радиолокационные методы проверяются при иной электромагнитной обстановке. Из отдельных показателей этих работ нельзя непосредственно получить вероятность обнаружения предмета под автомобилем или вагоном. Для обоснованного выбора нужно сопоставить принцип измерения и вид получаемых данных с тем, какие зоны и изменения доступны наблюдению в реальном досмотровом канале.

Цель исследования – систематизация методов трехмерной реконструкции и мультимодального анализа днища, определение условий их применения и обоснование архитектуры автоматизированного поиска посторонних предметов и конструктивных изменений. Сначала разграничены двумерные, 2,5D- и частично трехмерные пред-

ставления. Затем сопоставлены оптические и радиоволновые датчики, дополнительные сенсорные каналы, способы регистрации и построения доверенного эталона. Рассмотрение завершают методы обнаружения аномалий и показатели натурной проверки.

Материалы и методы исследования

Основной поиск литературы для обзора выполнен по состоянию на 3 сентября 2026 г. Использованы IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink, SPIE Digital Library, Optica Publishing Group, Proceedings of Machine Learning Research, репозиторий Computer Vision Foundation, eLIBRARY.RU, CyberLeninka, сайты профильных журналов и институциональные репозитории. Поиск охватывал сочетания *under-vehicle/undercarriage inspection*, *train bottom/railway bogie inspection*, *line-scan 3D*, *laser triangulation*, *structured light*, *time-of-flight*, *near-field MIMO imaging*, *3D anomaly detection*, *point-cloud registration* и *multimodal anomaly detection*. Русскоязычные запросы включали «досмотр днища», «контроль подвагонного оборудования», «линейный сканер», «лазерная триангуляция», «геометрические параметры колесных пар» и «техническое зрение на транспорте». Дополнительные работы отбирались по библиографическим связям. В обзор включены рецензируемые статьи, материалы профильных конференций и обзоры по измерительным схемам, физическим принципам, алгоритмам и ограничениям досмотра нижней части транспорта, а также по построению защищенных систем безопасности.

За рамками рассмотрения оставлены рекламные описания без воспроизводимой методики, работы только по верхнему или боковому распознаванию транспорта и исследования пути, не содержащие переносимого измерительного принципа. Библиографическая база содержит 46 источников за 1992–2026 гг. Из них 36 (78,3%) опубликованы в 2016–2026 гг. Более ранние работы привлечены как основополагающие для трехмерной съемки, радиолокационной визуализации и регистрации облаков точек. Несопоставимость объектов, аномалий и метрик не позволила выполнить метаанализ.

Сравнивались измерительные и алгоритмические принципы, а не коммерческие изделия. Для каждого учитывались физический механизм, размерность и плотность данных, выявляемые изменения, влияние затенения, движения, отражения и загрязнения, возможность контроля на рабочей скорости. Применимость оценивалась на трех уровнях: подтверждение непосред-

ственно на днище; перенос из близкой задачи с движущимся или крупногабаритным объектом; гипотеза, для которой еще требуется профильная проверка. Под технологической зрелостью здесь понимается готовность принципа к полному циклу досмотра, от синхронизации и калибровки до реконструкции, сравнения с эталоном и выдачи интерпретируемой тревоги.

Результаты исследования и их обсуждение

Представления данных: от панорамы к частичной трехмерной модели

Под названием «трехмерный досмотр» могут подразумеваться разные данные. Линейная панорама остается двумерным изображением, в том числе после перспективного преобразования в интерфейс. В карте глубины каждому элементу изображения соответствует одно расстояние. Это 2,5D-представление: несколько поверхностей вдоль одного луча, участки за колесами и балками оно не описывает. Облако точек одного напольного датчика уже содержит метрические координаты, но тоже охватывает лишь часть объекта. Для полной 3D-модели нужны наблюдения с нескольких направлений и их совмещение. Различия активных и пассивных дальнометрических методов затрагивают не только точность, но также пропуски и систематические ошибки измерений [11].

От вида данных зависит, какое изменение удастся обнаружить. Контейнер

на открытом участке выделяется на карте высот; тонкий провод, лента или плоская пластина могут быть заметнее по текстуре. Предмет за продольной балкой вообще не попадет в центральный напольный канал. Поэтому одной среднеквадратической ошибки глубины для оценки досмотра недостаточно. Нужны доля контролируемой поверхности, разрешение по высоте и вдоль движения, вероятность обнаружения в разных зонах, число ложных предупреждений на проход. Различия представлений сведены в табл. 1.

Пассивная стереоскопия и многовидовая линейная съемка

В стереопаре глубину z находят по диспаратности d , то есть смещению изображения одной и той же точки между кадрами. Для идеализированной фронтопараллельной схемы эта зависимость записывается как

$$z = bf / d. \quad (1)$$

В формуле (1) стереобаза b задает расстояние между камерами, а фокусное расстояние f выражено в пикселях. При неизменной погрешности определения d ошибка глубины растет приблизительно как z^2 ; увеличение произведения bf ее уменьшает. Малая дистанция съемки днища в этом отношении выгодна. Однако разнести камеры на произвольное расстояние нельзя: стереобаза ограничена шириной приямка, колесей и необходимостью защитить оборудование от механических повреждений.

Таблица 1

Уровни пространственного представления в системах досмотра

Представление	Состав данных	Доступная информация	Принципиальное ограничение
2D-панорама	Интенсивность или цвет в координатах изображения	Текстура, контуры, маркировка, видимые детали	Нет метрической глубины; различия перспективы имитируют изменения
Карта глубины (2,5D)	Одна глубина на пиксель или ячейку	Высота открытой поверхности, локальный рельеф	Не описывает скрытые и перекрывающиеся поверхности
Частичное облако точек	Координаты XYZ, при необходимости цвет и нормали	Метрическая геометрия нескольких видимых поверхностей	Пропуски из-за затенения, отражения и ограниченного угла обзора
Многовидовая 3D-модель	Совмещенные облака/сетки нескольких ракурсов	Более полная геометрия и объемные изменения	Сложность калибровки, регистрации и синхронизации
Мультимедальный цифровой образ	Геометрия, RGB/NIR, температура, РЛ-признаки и история	Форма, внешний вид, состояние узлов и доверие по каналам	Требуются приведение к общей системе координат и модель неопределенности

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования. 2,5D означает, что каждой координате плоскости наблюдения соответствует не более одного значения глубины.

На однотонной черной краске восстановление глубины затрудняется из-за отсутствия различных признаков для сопоставления. Повторяющиеся ребра дают несколько возможных соответствий, а блики на мокром металле меняются с ракурсом. Дополнительные камеры сокращают пропуски, но усложняют калибровку и обработку. При многовидовой линейной съемке вместе с геометрией получают подробную текстуру; по согласованию линий наблюдения оценивают также фактическое движение. Продольные координаты зависят от скорости, поэтому каждую строку необходимо точно привязать ко времени.

*Структурированный свет
и лазерная триангуляция*

Недостающую текстуру можно создать проекцией полос, точек или псевдослучайного рисунка. Камера регистрирует деформацию этого рисунка, по которой восстанавливается глубина. Высокоскоростные методы структурированного света включают одно- и многокадровые фазовые схемы, временное кодирование и их сочетания [12]. Последовательная запись фазовых кадров на движущемся объекте вносит артефакты; для такого режима предпочтительнее однокадровые или временно перекрывающиеся проекции [13]. В путевой системе [14] структурированная подсветка служила для обнаружения состава и межвагонных промежутков. Это пример эксплуатационного применения светового рисунка для синхронизации и выделения событий, но не получения карты глубины.

Под днищем проектор и камера могут видеть разные участки поверхности. Несколько пар из проектора и камеры позволяют уменьшить такие пропуски [15]. На блестящих деталях цветовая информация помогает выбирать экспозицию и восстанавливать форму [16], а объединение ракурсов с подгонкой поверхности дополнительно снижает число пропусков [17]. Вода, масло и зеркальные листы все же способны создавать ложные полосы или направлять излучение мимо приемника. Отсюда два требования к активной оптике: оценивать качество отдельных точек и предусматривать резервные направления измерения.

В лазерном профилометре камеру направляют под известным углом к плоскости лазерной подсветки. По положению поперечной линии на изображении восстанавливают профиль днища, а за время проезда получают последовательность таких сечений. Расстояние между ними

зависит от скорости v и частоты регистрации профилей f_p :

$$\Delta y = v / f_p. \quad (2)$$

Значение Δy характеризует продольную дискретизацию. Ошибка координат зависит также от геометрии триангуляции, размера светового пятна, экспозиции, отражения, вибрации и точности измерения скорости. Плотная последовательность профилей позволяет выделять выступы и оценивать объем добавленной геометрии. Отдельно решается задача охвата: вертикальный профилометр не измерит закрытую для него поверхность. Для исходной стационарной схемы предложены центральное и два наклонных направления. Их достаточность проверяют по карте видимости заданных классов транспорта; зоны около колес и боковых деталей при необходимости снимают с дополнительных ракурсов.

Непрерывное совмещение высокоразрешающей линейной и обзорной съемки исследовано для крупных промышленных деталей [18]. Трехкамерная линейная схема с оценкой движения [19] предназначена для узкого пространства, в том числе при контроле автомобилей и поездов. В железнодорожной метрологии линейный сканер рассмотрен для продольного профиля поверхности катания колеса [20]. Работы по дистанционному измерению колесных пар связывают результат с калибровкой и условиями движения [21]; автоматический комплекс [22] измеряет их форму и размеры лазерными триангуляционными сканерами на ходу. Эти решения обосновывают перенос линейной 3D-метрологии на транспортный досмотр. Поведение системы на загрязненном днище и при колебаниях подвески требует отдельной проверки.

*Времяпролетные камеры
и компактные лидары*

Времяпролетный датчик измеряет задержку импульса или фазовый сдвиг модулированного сигнала. В обзоре [23] выделены сканирующие дальномеры, камеры с одновременным захватом поля и гибридные схемы. Они дают глубину без поиска стереосоответствий и допускают компактное исполнение. Твердотельный лазерный дальномер подходит для предварительной оценки положения и габаритов автомобиля, крупных свисающих объектов. На мобильной платформе те же данные можно использовать для навигации.

Для небольших изменений на короткой дистанции поперечная плотность и точность времяпролетной камеры обычно ниже, чем у линейного профилометра. Черное покры-

тие дает слабый возврат, зеркало может насытить приемник, а у кромок смешиваются сигналы разных поверхностей. Между близкими металлическими деталями возникают многолучевые отражения. Поэтому достоинства вращающегося многолучевого дальномера, рассчитанного на дальний обзор, не делают его автоматически предпочтительным для приямка. В рассматриваемой схеме ему отводится обзорная и резервная роль; детальную метрическую поверхность предполагается получать триангуляцией.

*Миллиметровая радиолокация
с многоканальной
и синтезированной апертурой*

Радиолокация миллиметрового диапазона сохраняет информативность при недостатке освещения, пыли и оптических брызгах. Объемное изображение получают сканированием апертуры, решеткой с несколькими передатчиками и приемниками (MIMO) или синтезом апертуры (SAR). Возможности ближнепольной визуализации показаны при обнаружении скрытых объектов [24]. Дальнейшие разработки охватывают реконструкцию с миграцией по дальности для MIMO-решетки [25], одномерно сканируемую решетку [26] и разреженную апертуру [27].

Для FMCW-сигнала предельное разрешение по дальности приближенно равно

$$\Delta R \approx c / 2B, \quad (3)$$

где c обозначает скорость света, B задает эффективную полосу частот. При полосе 4 ГГц получаем около 3,75 см даже в идеальном случае. Это заметно грубее детализации короткобазовой оптической профилометрии. Разрешение поперек дальности определяется длиной волны, размером и заполнением апертуры, расстоянием и алгоритмом реконструкции. Движение транспорта позволяет синтезировать апертуру, если траектория известна достаточно точно для сохранения фазовой когерентности.

Металлическое днище осложняет радиолокационную реконструкцию. Зеркальные отражения и многолучевость дают ложные максимумы, сплошной металл экранирует расположенные за ним объекты. Проникновение через некоторые нематаллические материалы не означает универсальной возможности наблюдать сквозь конструкцию. Полезную роль mmWave-канала следует искать в подтверждении объемных изменений, получении признаков отражательной способности и работе при ухудшении оптической видимости. Для прототипа важен доступ к сырым ком-

плексным отсчетам: готовое разреженное облако точек уже не сохраняет часть фазовой информации.

*Дополнительные оптические
и тепловые каналы*

Тепловой канал информативен там, где имеется температурный контраст: на нагретых тормозах, бусах, электронных блоках, аккумуляторах и в зонах трения. Диагностическая ценность автоматического выделения колес и подшипников показана на тепловых изображениях [28]. Активная импульсная термография позволяет выявлять подповерхностные дефекты по тепловому отклику [29], но требует управляемого возбуждения и времени наблюдения, что затрудняет съемку проезжающего транспорта. Форму тепловизор измеряет недостаточно точно, а холодный инертный предмет после выравнивания температуры может вовсе не выделяться. Самостоятельным средством поиска посторонних предметов он поэтому не является.

Измерение поляризации отраженного света дает дополнительные сведения об ориентации поверхности и характере отражения [30]. Возможный выигрыш при съемке мокрого металла необходимо проверить именно в условиях досмотра. Коротковолновая инфракрасная и гиперспектральная съемка различают материалы по спектральному отражению [31], однако зависят от освещения, спектральной базы и загрязнения. Для первого этапа практической системы предлагается ограничиться цветной и ближней инфракрасной линейной съемкой, дополнив их поляризацией. Полноценную гиперспектральную аппаратуру разумно сначала исследовать на стенде. Назначение и ограничения датчиков сопоставлены в табл. 2.

*Регистрация, цифровой эталон
и компенсация изменчивости*

До поиска изменений текущие данные необходимо совместить с эталоном. Алгоритм ИСР уточняет совмещение, итерационно уменьшая расстояния между соответствующими точками [32]. Результат зависит от начального положения, выбросов и перекрытия облаков. Робастные варианты ослабляют влияние неверных соответствий и ускоряют сходимость [33]; обзоры рекомендуют предварять локальное уточнение грубой привязкой по признакам [34]. В досмотровой задаче малая средняя ошибка еще не означает корректной регистрации: алгоритм не должен подгонять эталон под посторонний предмет.

Таблица 2

Сравнительная применимость сенсорных технологий

Технология	Основной результат	Сильная сторона	Критические ограничения	Рекомендуемая роль
RGB/NIR line-scan	Панорама высокой детализации	Текстура, маркировка, тонкие и плоские изменения	Нет глубины; освещение, грязь, блики, продольный масштаб	Обязательный визуальный канал
Пассивная стереоскопия	Карта глубины + текстура	Не требует проектора; согласованная RGB-геометрия	Слабая текстура, вторичность, отражение, окклюзия	3D-канал при контролируемом освещении
Структурированный свет	Плотная карта глубины	Работает на однотонных поверхностях	Движение при многокадровом коде, паразитный свет, зеркальность	Активная стереоскопия на малой скорости или в работе
Лазерная триангуляция	Последовательность точных профилей	Высокая плотность и метричность на короткой дистанции	Тени, отражение, окно сенсора, калибровка и скорость	Основной геометрический канал
ToF / compact LiDAR	Карта глубины или обзорное облако	Компактность, прямое измерение, широкий обзор	Меньшая детализация, multipath, границы и черные покрытия	Позиционирование, крупные объекты, робот
mmWave MIMO/SAR	РЛ-объем или отражательная карта	Не зависит от освещения, устойчив к оптической пыли	Сантиметровое разрешение, металл, многолучевость, большая апертура	Подтверждающий экспериментальный канал
Тепловизор	Температурная карта	Нагретые узлы, трение, включенная электроника	Не видит холодный объект после выравнивания	Диагностика и подтверждение
Поляризация / SWIR	Оптические свойства поверхности и материала	Блики, пленки, жидкости, материалоспецифичные признаки	Калибровка, освещение, стоимость и отсутствие профильных данных	Специализированный дополнительный канал

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования. Оценка относится к досмотру нижней части транспорта, а не к универсальным возможностям соответствующего класса датчиков.

Для начальной привязки подходят устойчивые ориентиры: центры колес, оси, продольные балки, крепления и жесткие плоскости кузова. Поворотные колеса, подвеска, шланги, выхлопная система и деформируемые защиты требуют отдельных масок или допустимых диапазонов положения. Уточнение по расстоянию от точки до плоскости либо робастным ИСР выполняется только на стабильных областях. Подозрительный участок исключается из оптимизации, иначе часть искомого изменения будет компенсирована при совмещении. Совместный учет регистрации, разрешения и неполного перекрытия необходим и в общей задаче трехмерного обнаружения изменений [35].

Сравнение наиболее информативно при наличии доверенного эталона именно того автомобиля или вагона, который проходит досмотр. Набор подтвержденных нормальных проходов позволяет дополнительно учесть естественную вариативность.

Эталон модели или комплектации пригоден при первом въезде, но ремонт, дополнительное оборудование и производственные различия увеличивают число ложных тревог. Обновлять эталон после каждого прохода без проверки нельзя: закрепленный посторонний предмет со временем станет частью принятой нормы. Обновление должно следовать за регламентным осмотром, создавать новую версию и сохранять прежнюю историю.

Обнаружение геометрических и мультимодальных аномалий

Геометрическое сравнение выполняют после совмещения: для текущих точек находят знаковое расстояние до эталона, затем учитывают нормали и объем связанных областей отклонения. Выступающий предмет дает непосредственно измеримый результат. Для тонких, плоских объектов и деталей на фоне сложного узла привлекают также текстурные и семантические признаки.

При выборе формы эталона существенна сохранность мелкого рельефа. Многослойная карта глубины, сетка, TSDF/SDF либо набор облаков должны передавать разрывы поверхности без сглаживания добавленной детали.

Безучительские методы промышленного контроля сравнивают на согласованных цветных и трехмерных данных MVТес 3D-AD [36]. В модели «ученик – учитель» отклонение от нормальной формы ищут по локальным геометрическим дескрипторам облака [37]. Для объединения модальностей используются гибридная память признаков изображения и облака [38] либо слияние, направляемое информацией о форме [39]. Для досмотра важен общий принцип этих решений: текстурное изменение может слабо проявляться в глубине, а изменение рельефа не обязательно сопровождаться заметной сменой цвета.

Недостаток объемных наблюдений в [40] компенсируют обучением представлений глубины на синтетических картах с переносом на реальные поверхности. Метод [41] восстанавливает нормальную геометрию диффузионной моделью и оценивает аномалию по остаточной разности. Набор Real-IAD D3 [42] расширяет разнообразие двумерных, псевдотрехмерных и трехмерных данных для сопоставления методов. При переносе на днеще проверку следует вести с учетом масштаба объекта, перекрытий, грязи и подвижности узлов. Поверхность здесь наблюдается не целиком, поэтому лабораторные оценки еще не характеризуют работу в досмотровом канале.

Визуальную часть сравнения можно построить по схеме PatchCore [43], сопоставляя локальные признаки с компактной памятью нормальных образцов. Для геометрического канала остаются значимыми качество сканирования, представление поверхности и регистрация; их роль рассматривается в обзоре [44]. В предлагаемом комплексе нейросетевой анализ и метрическое сравнение выполняются параллельно, после чего их интерпретируемые признаки объединяются. Такая схема сохраняет самостоятельный результат измерения геометрии.

Для объединения оценок четырех каналов на одном участке рассматривается взвешенная сумма

$$S = w_g S_g + w_v S_v + w_t S_t + w_r S_r. \quad (4)$$

В выражении (4) геометрическому каналу соответствует S_g , визуальному, включая семантические признаки, S_v , тепловому – S_t , радиолокационному – S_r . Оценки приведены к диапазону от 0 до 1; веса w_k неотрицательны, их сумма равна единице. Вес

задают с учетом качества измерения в данном проходе. Например, загрязненное оптическое окно снижает доверие к оптическим данным. Недоступный канал исключают, а оставшиеся веса перенормируют. При настройке учитывают связь признаков между собой, чтобы не принять их за независимые подтверждения. Отсутствие отклика радара не должно подавлять достоверное лазерное изменение. Вместе с баллом оператору выводят сравниваемые фрагменты, локализацию, высоту и объем отклонения, а также причины снижения доверия.

Архитектура автомобильного и железнодорожного досмотра

Вариант комплекса для автомобильного пункта предусматривает размещение датчиков в напольной рампе или приямке. Линейная RGB/NIR-камера записывает панораму, а центральный и два наклонных профилометра собирают геометрию. Съемку синхронизируют с импульсной подсветкой и данными энкодера либо независимого измерителя скорости. Регистрационный знак связывает проход с конкретным автомобилем. Скорость задают по требуемому шагу профилей и допустимой экспозиции. По карте видимости уточняют число и наклон датчиков; при недостаточном обзоре колес добавляют внешние ракурсы. Полиризационная камера, тепловизор и экспериментальный миллиметровый радар решают дополнительные задачи.

На железной дороге нижние каналы располагают между рельсами и снаружи них с учетом колесных пар и геометрии тележки. Боковые линейные камеры и профилометры направляют на вертикальные поверхности, нижние датчики защищают от механических воздействий. Измерения привязывают к оси и вагону по датчикам колес, доплеровской оценке скорости и распознаванию номера; радиочастотную метку используют при ее наличии. Температурные данные дополняют контроль букс, тормозов и колес. Для каждого вагона ведут историю проходов. Охранные тревоги и диагностические признаки оценивают отдельно, поскольку у них разные пороги и последствия.

Под стоящим транспортом можно менять мобильную платформу. Робот меняет направление наблюдения и приближается к закрытой зоне, получая более полную модель, чем фиксированный нижний сканер. Осмотр занимает больше времени; нужны навигация, контроль зазора и учет неровностей и загрязнения покрытия. Такой вариант рассматривается для повторного досмотра после тревоги либо для площадок без приямка. Платформенные решения

для обслуживания подвижного состава описаны в [45]. Их применение в досмотровой задаче потребует метрической привязки датчиков и карты видимости. Связь стационарного или мобильного комплекса с другими подсистемами относится к задачам построения защищенной интегрированной системы безопасности объекта [46].

Сочетание профилометра с линейной камерой обосновано различием измеряемых признаков: первый регистрирует плотный метрический профиль, вторая сохраняет текстуру, включая тонкие визуальные изменения. При затенении или загрязнении оптики оба могут терять данные, поэтому их наличие еще не обеспечивает резервирования. Радар менее чувствителен к оптическим помехам, но ограничен разрешением и отражениями от металла; тепловой канал полезен при температурном контрасте. Дополнительный датчик следует включать там, где его информация восполняет конкретный пропуск основного канала.

Метрическую точность нижнего сканера нужно оценивать на той части днища, которую он наблюдает. Даже погрешность в десятые доли миллиметра не характеризует предмет за балкой, откуда измерение не получено. Наклонные ракурсы увеличи-

вают охват, но оставшиеся закрытые зоны следует обозначать на карте видимости. Эта маска нужна и для эталона: отсутствие данных в зоне не должно интерпретироваться как отсутствие изменения.

Индивидуальный эталон избавляет от сравнения разных штатных конструкций, но не от изменчивости самого транспортного средства. На геометрию и сигнатуры влияют загрузка, температура, загрязнение и подвижные узлы. Поэтому нормальное состояние следует описывать распределением допустимых вариантов. Робастная регистрация и семантическое разделение стабильных и изменяемых областей позволяют сравнивать очередной проход с такой нормой.

Для обучения и проверки нужны днища в эксплуатационных условиях, а не только небольшие лабораторные изделия. В профильных данных должны присутствовать грязь, снег, соль, масло, поглощающие и зеркальные поверхности, разные скорости и нагрузки. Оценка одной AUROC не раскрывает качество досмотра. Необходимы вероятность обнаружения отдельных предметов, полнота локализации, минимальный обнаруживаемый объем и число ложных тревог на проход.

Таблица 3

Рекомендуемые показатели натурных испытаний системы

Группа	Показатель	Способ представления результата	Почему среднего значения недостаточно
Обнаружение	Вероятность обнаружения постороннего предмета	Зависимость от размеров, материала, зоны, ориентации и скорости; доверительный интервал	Среднее скрывает «слепые» зоны и трудные классы предметов
Ложные тревоги	Число ложных предупреждений	На проход, на единицу транспорта и на контролируемую площадь	Процент кадров не отражает нагрузку на оператора
Геометрия	Ошибка глубины и регистрации	Медиана, p95/p99, локальные карты; отдельно по сенсорным каналам	Средняя ошибка не показывает локальные выбросы у кромок и бликов
Наблюдаемость	Доля контролируемой поверхности и объема	Карта видимости по модели транспортного средства	Точность нельзя интерпретировать в неизмеренной зоне
Устойчивость	Деградация в сложных условиях	Матрица: сухо/мокро/грязь/снег × день/ночь × скорость	Один стендовый режим не характеризует эксплуатацию
Производительность	Пропускная способность и задержка	Время от триггера до тревоги, доля пропущенных профилей, загрузка вычислителя	Средняя частота не выявляет перегрузки и хвосты задержки
Метрология	Стабильность калибровки	Дрейф по времени и температуре, результат самопроверки по эталону	Начальная калибровка не гарантирует корректность после эксплуатации
Интерпретируемость	Полнота доказательной информации	Текущий/эталонный фрагмент, 3D-локализация, признаки каналов, неопределенность	Бинарная тревога не позволяет оператору оценить причину

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования. Обозначения p95 и p99 соответствуют 95-му и 99-му процентилем распределения.

Испытания также следует разделять по тому, что именно они подтверждают: точность датчика в лаборатории, реконструкцию калибровочного объекта, обнаружение имитаторов на стенде или эффективность в транспортном потоке. Высокая плотность профиля, например, не гарантирует возврата от черного покрытия. Плотность нейросетевого облака может увеличиваться за счет интерполяции, а не новых измерений. Показатели, позволяющие оценить систему в натурных условиях, приведены в табл. 3.

Ограничения обзора и направления дальнейших исследований

Выводы обзора опираются на неоднородную литературу. Непосредственной 3D-реконструкции днища посвящены единичные публикации; часть решений заимствована из промышленной метрологии и путевого мониторинга. Ранжирование коммерческих систем не проводилось. Независимых испытаний с едиными предметами и условиями практически нет, поэтому вычислять по имеющимся работам сводную точность было бы некорректно.

Для дальнейшего сравнения методов нужен открытый набор синхронных RGB/NIR-изображений, лазерных профилей, тепловых и, по возможности, радиолокационных измерений. Разметка должна связывать геометрию и наблюдаемость с положением и материалом имитатора, состоянием поверхности, скоростью и нагрузкой. Наряду с аномалиями обязательны отрицательные серии. Длительные наблюдения необходимы для оценки дрейфа калибровки и загрязнения защитных окон.

Перспективные направления включают самооценку качества, адаптивную подсветку, слияние каналов с учетом неопределенности и использование истории транспорта. Для радара требуется ближнепольная фазокогерентная реконструкция на фоне штатных металлических деталей. Для робота важен выбор следующего ракурса по карте невидимых зон. Во всех случаях нужно сохранять проверяемую связь тревоги с физическим измерением, не допуская неконтролируемого восстановления отсутствующих данных.

Заключение

Трехмерный досмотр требует согласованной работы измерительных каналов, калибровки, регистрации, эталона и алгоритма поиска аномалий. Напольная съемка с одного направления дает только частичную 3D- или 2,5D-модель. Расширить наблюдаемую область позволяют наклонные каналы и мобильный робот.

В основу стационарного комплекса предлагается положить линейную RGB/NIR-камеру и три лазерных профилометра: центральный и два наклонных, синхронизированных с измерением скорости. Окончательное число каналов определяется картой видимости соответствующего класса транспорта. Времяпролетным камерам и дальномерам отводится получение обзорной геометрии и позиционирование. Тепловизор и миллиметровый радар дополняют детальную оптическую реконструкцию, но не заменяют ее.

Доверенный эталон конкретного автомобиля или вагона, привязка по стабильным областям и раздельная оценка признаков разных каналов составляют основу обнаружения изменений. Готовность системы к эксплуатации следует оценивать по вероятности обнаружения в разных зонах и для разных предметов, доле наблюдаемой поверхности и числу ложных тревог на проход во всем диапазоне условий. Профильный мультимодальный набор данных и воспроизводимые натурные испытания необходимы для перехода от предложенной архитектуры к сопоставимым оценкам ее эффективности.

Список литературы

1. Dickson P. E., Li J., Zhu Z., Hanson A. R., Riseman E. M., Sabrin H., Schultz H. J., Whitten G. Mosaic generation for under vehicle inspection // Proceedings of the Sixth IEEE Workshop on Applications of Computer Vision. 2002. P. 251–256. DOI: 10.1109/ACV.2002.1182190.
2. Sukumar S. R., Page D. L., Gribok A. V., Koschan A. F., Abidi M. A., Gorsich D. J., Gerhart G. R. Robotic three-dimensional imaging system for under-vehicle inspection // Journal of Electronic Imaging. 2006. Vol. 15. Is. 3. Art. 033008. DOI: 10.1117/1.2238565.
3. Schlake B. W., Todorovic S., Edwards J. R., Hart J. M., Ahuja N., Barkan C. P. L. Machine vision condition monitoring of heavy-axle load railcar structural underframe components // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F // Journal of Rail and Rapid Transit. 2010. Vol. 224. Is. 5. P. 499–511. DOI: 10.1243/09544097JRRRT376.
4. Yao Z., He D., Chen Y., Liu B., Miao J., Deng J., Shan S. Inspection of exterior substance on high-speed train bottom based on improved deep learning method // Measurement. 2020. Vol. 163. Art. 108013. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108013.
5. Krishnamohan K., Prasad C. R., Kishore P. V. V. Train rolling stock video segmentation and classification for bogie part inspection automation: a deep learning approach // Journal of Engineering and Applied Science. 2022. Vol. 69. Art. 69. DOI: 10.1186/s44147-022-00128-x.
6. Shaikh M. Z., Ahmed Z., Baro E. N., Hussain S., Milano-va M. Deep learning based identification and tracking of railway bogie parts // Alexandria Engineering Journal. 2024. Vol. 107. P. 533–546. DOI: 10.1016/j.aej.2024.07.064.
7. Alif M. A. R., Tucker G., Hussain M. Advances in computer vision for comprehensive railway engineering: from track inspection to rolling stock and safety monitoring // Railway Engineering Science. 2026. DOI: 10.1007/s40534-026-00434-7.
8. Mosleh A., Mohammadi M., Silva R., Magalhães J., Jorge T., Vale C., Ribeiro D., Zhai W. Recent advances in way-

side condition monitoring for railways: a comprehensive review // *Railway Engineering Science*. 2026. DOI: 10.1007/s40534-025-00423-2.

9. Сунь Х., Чжуан С., Костров А. А. Обзор современных систем технического зрения, применяемых в транспортной отрасли // *Современные наукоемкие технологии*. 2024. № 9. С. 69–73. DOI: 10.17513/snt.40150.

10. Kumar A., Harsha S. P. A systematic literature review of defect detection in railways using machine vision-based inspection methods // *International Journal of Transportation Science and Technology*. 2025. Vol. 18. P. 207–226. DOI: 10.1016/j.ijst.2024.06.006.

11. Blais F. Review of 20 years of range sensor development // *Journal of Electronic Imaging*. 2004. Vol. 13. Is. 1. P. 231–243. DOI: 10.1117/1.1631921.

12. Zhang S. High-speed 3D shape measurement with structured light methods: a review // *Optics and Lasers in Engineering*. 2018. Vol. 106. P. 119–131. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2018.02.017.

13. Wu Z., Guo W., Zhang Q., Wang H., Li X., Chen Z. Time-overlapping structured-light projection: high performance on 3D shape measurement for complex dynamic scenes // *Optics Express*. 2022. Vol. 30. Is. 13. P. 22467–22486. DOI: 10.1364/OE.460088.

14. Попов С. Б. Использование структурированной подсветки в системах технического зрения // *Компьютерная оптика*. 2013. Т. 37. № 2. С. 233–238. DOI: 10.18287/0134-2452-2013-37-2-233-238.

15. He K., Sui C., Lyu C., Wang Z., Liu Y. 3D reconstruction of objects with occlusion and surface reflection using a dual monocular structured light system // *Applied Optics*. 2020. Vol. 59. № 29. P. 9259–9271. DOI: 10.1364/AO.402146.

16. Zhu Z., Yang C., Zhang H., Zhang F., Liu X. Use of color information for structured-light 3D shape measurement of objects with shiny surfaces // *Applied Optics*. 2020. Vol. 59. Is. 23. P. 6873–6880. DOI: 10.1364/AO.397393.

17. Feng W., Liu Q., Wang H., Xu J., Wang X. 3D reconstruction of a highly reflective surface based on multi-view fusion and point cloud fitting with a structured light field // *Applied Optics*. 2025. Vol. 64. Is. 5. P. A73–A83. DOI: 10.1364/AO.544519.

18. Ma L., Yang L., Liao R., Yang S., Zhu J. Flexible high-resolution continuous 3-D scanning for large-scale industrial components // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2023. Vol. 72. Art. 5009316. DOI: 10.1109/TIM.2023.3250303.

19. Ma L., Zhu J., Yang L., Liu H., Fan Y., Yang S. Triple line-scan camera measurement for efficient and accurate narrow-space 3-D scanning with motion estimation // *Optics Express*. 2024. Vol. 32. Is. 5. P. 8397–8414. DOI: 10.1364/OE.517613.

20. Лексупов И. С., Клюка В. П. К возможности применения линейного сканера для создания средств технического контроля геометрических параметров продольного сечения поверхности колеса вагона // *Известия Транссиба*. 2022. № 3 (51). С. 51–63. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-vozmozhnosti-primeneniya-lineynogo-skanera-dlya-sozdaniya-sredstv-tehnicheskogo-kontrolya-geometricheskikh-parametrov-prodnolnogo> (дата обращения: 21.09.2026).

21. Нуриев А. Г., Чистяков Э. Ю., Битюцкий Н. А. Развитие использования дистанционных измерений по определению геометрических параметров колесных пар // *Бюллетень результатов научных исследований*. 2023. № 1. С. 7–18. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-7-18.

22. Новицкий А. А., Шахлевич Г. М. Лазерный комплекс для измерения параметров колесных пар подвижного состава // *BIG DATA и анализ высокого уровня: сборник научных статей X Международной научно-практической конференции* (г. Минск, 13 марта 2024 г.): в 2 ч. Ч. 2. Минск: БГУИР, 2024. С. 26–30. [Электронный ресурс]. URL: <https://libeloc.bsuir.by/handle/123456789/54743> (дата обращения: 21.09.2026).

23. Horaud R., Hansard M., Evangelidis G., M  nier C. An overview of depth cameras and range scanners based on time-of-flight technologies // *Machine Vision and Applications*. 2016. Vol. 27. Is. 7. P. 1005–1020. DOI: 10.1007/s00138-016-0784-4.

24. Sheen D. M., McMakin D. L., Hall T. E. Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2001. Vol. 49. Is. 9. P. 1581–1592. DOI: 10.1109/22.942570.

25. Zhuge X., Yarovoy A. G. Three-dimensional near-field MIMO array imaging using range migration techniques // *IEEE Transactions on Image Processing*. 2012. Vol. 21. Is. 6. P. 3026–3033. DOI: 10.1109/TIP.2012.2188036.

26. Gao J., Qin Y., Deng B., Wang H., Li X. Novel efficient 3D short-range imaging algorithms for a scanning 1D-MIMO array // *IEEE Transactions on Image Processing*. 2018. Vol. 27. Is. 7. P. 3631–3643. DOI: 10.1109/TIP.2018.2821925.

27. Wang F., Deng B., Yang Q., Wang H., Zhang Y. A fast 3D near range imaging algorithm for a scanning sparse MIMO array in the millimeter band // *Sensors*. 2020. Vol. 20. Is. 17. Art. 4701. DOI: 10.3390/s20174701.

28. Deilamsalehy H., Havens T. C., Lautala P. T., Medici E. F., Davis J. An automatic method for detecting sliding railway wheels and hot bearings using thermal imagery // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F // Journal of Rail and Rapid Transit*. 2017. Vol. 231. Is. 6. P. 690–700. DOI: 10.1177/0954409716638703.

29. Vavilov V. P., Burleigh D. D. Review of pulsed thermal NDT: physical principles, theory and data processing // *NDT & E International*. 2015. Vol. 73. P. 28–52. DOI: 10.1016/j.ndteint.2015.03.003.

30. Atkinson G. A., Hancock E. R. Recovery of surface orientation from diffuse polarization // *IEEE Transactions on Image Processing*. 2006. Vol. 15. Is. 6. P. 1653–1664. DOI: 10.1109/TIP.2006.871114.

31. Song H., Yeo S., Jin Y., Park I., Ju H., Nalcakan Y., Kim S. Short-Wave Infrared (SWIR) Imaging for Robust Material Classification: Overcoming Limitations of Visible Spectrum Data // *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. Is. 23. Art. 11049. DOI: 10.3390/app142311049.

32. Besl P. J., McKay N. D. A method for registration of 3-D shapes // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1992. Vol. 14. Is. 2. P. 239–256. DOI: 10.1109/34.121791.

33. Zhang J., Yao Y., Deng B. Fast and robust iterative closest point // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2022. Vol. 44. Is. 7. P. 3450–3466. DOI: 10.1109/TPAMI.2021.3054619.

34. Brightman N., Fan L., Zhao Y. Point cloud registration: a mini-review of current state, challenging issues and future directions // *AIMS Geosciences*. 2023. Vol. 9. Is. 1. P. 68–85. DOI: 10.3934/geosci.2023005.

35. Qin R., Tian J., Reinartz P. 3D change detection – approaches and applications // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2016. Vol. 122. P. 41–56. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2016.09.013.

36. Bergmann P., Jin X., Sattlegger D., Steger C. The MVTec 3D-AD dataset for unsupervised 3D anomaly detection and localization // *Proceedings of the 17th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications*. 2022. Vol. 5. P. 202–213. DOI: 10.5220/0010865000003124.

37. Bergmann P., Sattlegger D. Anomaly detection in 3D point clouds using deep geometric descriptors // *2023 IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision*. 2023. P. 2612–2622. DOI: 10.1109/WACV56688.2023.00264.

38. Wang Y., Peng J., Zhang J., Yi R., Wang Y., Wang C. Multimodal industrial anomaly detection via hybrid fusion // *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2023. P. 8032–8041. DOI: 10.1109/CVPR52729.2023.00776.

39. Chu Y.-M., Liu C., Hsieh T.-I., Chen H.-T., Liu T.-L. Shape-guided dual-memory learning for 3D anomaly detection // Proceedings of the 40th International Conference on Machine Learning. Proceedings of Machine Learning Research. 2023. Vol. 202. P. 6185–6194. URL: <https://proceedings.mlr.press/v202/chu23b.html> (дата обращения: 21.09.2026).
40. Zavrtanik V., Kristan M., Skočaj D. Cheating depth: enhancing 3D surface anomaly detection via depth simulation // 2024 IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision. 2024. P. 2153–2161. DOI: 10.1109/WACV57701.2024.00216.
41. Zhou Z., Wang L., Fang N., Wang Z., Qiu L., Zhang S. R3D-AD: reconstruction via diffusion for 3D anomaly detection // Computer Vision – ECCV 2024. Lecture Notes in Computer Science. 2025. Vol. 15094. P. 91–107. DOI: 10.1007/978-3-031-72764-1_6.
42. Zhu W., Wang L., Zhou Z., Wang C., Pan Y., Zhang R., Chen Z., Cheng L., Gao B.-B., Zhang J., Gan Z., Wang Y., Chen Y., Qian S., Chi M., Peng B., Ma L. Real-IAD D3: a real-world 2D/pseudo-3D/3D dataset for industrial anomaly detection // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2025. P. 15214–15223. DOI: 10.1109/CVPR52734.2025.01417.
43. Roth K., Pemula L., Zepeda J., Schölkopf B., Brox T., Gehler P. Towards total recall in industrial anomaly detection // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2022. P. 14318–14328. DOI: 10.1109/CVPR52688.2022.01392.
44. Du J., Tao C., Cao X., Tsung F. 3D vision-based anomaly detection in manufacturing: a survey // Frontiers of Engineering Management. 2025. Vol. 12. P. 343–360. DOI: 10.1007/s42524-025-4189-9.
45. Дудоров Е. А., Кудюкин В. В., Котова К. А. Робототехнические комплексы обслуживания подвижного состава российских железных дорог // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2022. № 9 (750). С. 3–15. DOI: 10.18698/0536-1044-2022-9-3-15. EDN: OANIVQ.
46. Белкин Е. Н., Зайончковская Д. А. Построение защищенных интегрированных систем безопасности объектов УИС // Информатизация и техническое обеспечение уголовно-исполнительной системы Российской Федерации: проблемы, решения и перспективы развития: сборник материалов II Всероссийской научно-практической конференции (Тверь, 04–05 октября 2023 г.). Тверь: Научно-исследовательский институт информационных технологий ФСИН России, 2023. С. 28–34. EDN: OHZOJH.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование: Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.