УДК 617.3
doi: 10.21685/2072-3032-2026-1-4

Прогнозирование и диагностика перипротезной инфекции: возможности машинного обучения (литературный обзор)

Я. П. Моисеев[1], К. В. Сидорук[2], К. В. Полонская[3], А. Е. Ватанин[4], А. Н. Митрошин[5]

[1,3,4,5]Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
[2]Университетский клинический центр имени В. В. Виноградова (филиал) Российского университета дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия
[1]moiseev.yakov26@gmail.com, [2]sidoruk_kv@pfur.ru, [3]ksen-pol@mail.ru, [4]sasavatanin2002@gmail.com, [5]an-mitroshin@mail.ru

Аннотация. Прогнозирование перипротезной инфекции (ППИ) имеет решающее значение для определения стратегии лечения, улучшения его результатов, снижения экономических потерь. В условиях роста числа первичных и ревизионных вмешательств на крупных суставах ППИ остается одним из наиболее тяжелых осложнений, частота которого, по прогнозам, будет увеличиваться. Диагностика ППИ связана со значительными сложностями, включая как ограничения традиционных культуральных, так и новых молекулярных методов. Поиск более надежных, недорогих, удобных для использования прогностических, диагностических маркеров и их комбинаций из многочисленных сложных клинико-лабораторных показателей остается актуальным направлением исследований. Одним из наиболее перспективных подходов является дальнейшая разработка и оценка моделей машинного обучения, способных интегрировать широкий спектр биомаркеров и клинических данных, выявляя скрытые закономерности и повышая точность прогнозирования и диагностики ППИ.

Ключевые слова: перипротезная инфекция, тотальное эндопротезирование крупных суставов, искусственный интеллект, машинное обучение, прогнозирование, диагностика

Для цитирования: Моисеев Я. П., Сидорук К. В., Полонская К. В., Ватанин А. Е., Митрошин А. Н. Прогнозирование и диагностика перипротезной инфекции: возможности машинного обучения (литературный обзор) // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Медицинские науки. 2026. № 1. С. 42–58. doi: 10.21685/2072-3032-2026-1-4

Prediction and diagnosis of periprosthetic infection: machine learning capabilities (literature review)

Y.P. Moiseev[1], K.V. Sidoruk[2], K.V. Polonskaya[3], A.E. Vatanin[4], A.N. Mitroshin[5]

[1,3,4,5]Penza State University, Penza, Russia
[2]V.V. Vinogradov University Clinical Center, branch of RUDN University, Moscow, Russia
[1]moiseev.yakov26@gmail.com, [2]sidoruk_kv@pfur.ru, [3]ksen-pol@mail.ru, [4]sasavatanin2002@gmail.com, [5]an-mitroshin@mail.ru

Abstract. Predicting periprosthetic joint infection (PJI) is crucial for determining treatment strategies, improving outcomes, and reducing economic losses. With the increasing number of primary and revision interventions on large joints, PJI remains one of the most severe

© Моисеев Я. П., Сидорук К. В., Полонская К. В., Ватанин А. Е., Митрошин А. Н., 2026. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

complications, the incidence of which is predicted to increase. Diagnosing PJI is associated with significant challenges, including the limitations of both traditional culture-based and new molecular methods. The search for more reliable, inexpensive, and user-friendly prognostic and diagnostic markers and their combinations from numerous complex clinical and laboratory parameters remains a relevant area of research. One of the most promising approaches is the further development and evaluation of machine learning models capable of integrating a wide range of biomarkers and clinical data, revealing hidden patterns and improving the accuracy of PJI prediction and diagnosis.

Keywords: periprosthetic joint infection, total joint arthroplasty, artificial intelligence, machine learning, prediction, diagnostics

For citation: Moiseev Y.P., Sidoruk K.V., Polonskaya K.V., Vatanin A.E., Mitroshin A.N. Prediction and diagnosis of periprosthetic infection: machine learning capabilities (literature review). *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Meditsinskie nauki = University proceedings. Volga region. Medical sciences.* 2026;(1):42–58. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3032-2026-1-4

Ежегодно в мире, в том числе в России, в связи с увеличением продолжительности жизни неуклонно растет количество пациентов с патологией крупных суставов, нуждающихся в проведении тотального эндопротезирования [1], что, в свою очередь, обусловливает прирост числа ревизионных вмешательств [2]. Так, прогнозируемый рост числа операций тотального эндопротезирования тазобедренного сустава (ТЭТБС) в популяции Medicare в США составляет 659 % к 2060 г. [3]. Эпидемиологические исследования показывают, что вслед за ТЭТБС потребность в ревизионных вмешательствах будет продолжать расти из года в год, создавая серьезную проблему для системы здравоохранения [4, 5].

Основными причинами несостоятельности крупных суставов являются асептическое расшатывание протеза и инфекционные осложнения, включая перипротезную инфекцию (ППИ) [6–9]. Так, согласно данным ФГБУ «НМИЦ ТО им. Р. Р. Вредена» Минздрава России за 2007–2020 гг., асептическая нестабильность компонентов протезированного сустава является наиболее часто встречающимся осложнением, а ППИ лишь незначительно уступает асептическому расшатыванию компонентов – на ее долю приходится 40,8 % [10], причем, по данным Георг Хауэр и соавторов (2024), после эндопротезирования коленного и тазобедренного суставов относительный риск асептического расшатывания снизился, а риск септических осложнений увеличился по сравнению с данными 10-летней давности: процент инфекционных осложнений, приведших к замене коленного сустава, возрос с 14,8 до 21,6 %, после ТЭТБС – с 7,5 до 18,2 % [8].

По данным американских коллег, ППИ является наиболее частой причиной несостоятельности при ревизионном ТЭТБС, на которую приходится 30,2 % от всех ревизий [11], по данным И. И. Шубнякова и соавторов, «в группе ре-ревизий абсолютным лидером являлась инфекция, составляя более половины всех причин» [12], прогнозируется рост ревизионных вмешательств в связи с ППИ [5].

Основным механизмом развития асептической нестабильности компонентов протезированного сустава считается остеолиз, вызванный частицами имплантата, патогенез которого включает воспалительные и остеолитические процессы [13, 14]. После установки эндопротеза образуется синовиально-

подобная околопротезная мембрана, формирующая псевдокапсулу [15], в которой продукты износа активируют иммунные клетки, вырабатывающие провоспалительные и проостеокластогенные цитокины, усиливающие привлечение и активность остеокластов, прилегающих к поверхности контакта кость–имплантат и окружающих ее, что приводит к доминированию костной резорбции над костеобразованием и локальной деструкции костной ткани [16].

Причиной септического воспаления является наличие инфекционного процесса в области имплантации [17]. ППИ, как причина ревизионного вмешательства, несколько уступает по частоте асептической нестабильности, но предполагает более катастрофический прогноз [18]. Последствия ППИ включают ампутацию конечности, смерть и значительные экономические издержки для систем здравоохранения и пациентов [19, 20]. Исследования последних лет выявили, что внутрибольничная летальность от ППИ составляет около 3,5 %, а в случае развития синдрома системного воспалительного ответа резко возрастает [21, 22]. А. А. Вороков и соавторы (2020) на основе анализа литературных источников за 20-летний период сообщают, что летальность у пациентов с ППИ по сравнению с пациентами, перенесшими асептическую ревизионную артропластику, через 90 дней составила 3,7 % против 0,8 %, через год – 10,6 % против 2,0 %, через два года – 13,6 % против 3,9 % и через пять лет – 25,9 % против 12,9 % [1].

По определению асептическое расшатывание протекает без признаков инфекции, проявляясь клинически – болью и нарушением функции сустава, рентгенологически – образованием зоны перипротезного остеолиза и миграцией эндопротеза [23]. Однако многочисленные исследования подтверждают концепцию о том, что бактерии также могут играть роль в развитии асептического расшатывания [24, 25], и воздействие частиц износа имплантата может усиливаться инфекцией.

Микробиологическое исследование остается краеугольным камнем диагностики ППИ, позволяя идентифицировать возбудителя и определять чувствительность к антимикробным препаратам [26]. Так, С. А. Линник и соавторы (2025) сообщают о положительных результатах микробиологического культивирования у 5,1 % пациентов группы с асептической нестабильностью, а в случае применения метода полимеразной цепной реакции биоптатов – у 20,3 % [24].

По результатам исследований последних лет, непредвиденные положительные интраоперационные культуры встречаются во время ревизии эндопротезов крупных суставов в связи с асептической нестабильностью с частотой 8,3–26,1 % [27–31]. Н. С. Николаев и соавторы (2021) сообщают, что в федеральном травматолого-ортопедическом центре (г. Чебоксары) частота «неожиданных» инфекций у пациентов с первично диагностированным асептическим расшатыванием эндопротеза достигает 2,08 % [32].

Попытки определить клиническое значение неожиданно положительных бактериальных культур в условиях предполагаемой асептической ревизионной операции были предприняты в последние годы в нескольких исследованиях в отношении выживаемости имплантатов, частоты ревизий и соответствующей лечебной тактики [28, 30, 31], были получены противоречивые результаты. Так, С. Варгас-Реверон и соавторы (2025) сообщили, что непредвиденные положительные интраоперационные культуры не были достоверно

связаны с повышенным риском повторной ревизии при 5-летнем наблюдении [33]. Напротив, С. Д. Ву и соавторы (2024) указали на высокую частоту повторных ревизий вследствие сопутствующей ППИ при наличии двух и более непредвиденных положительных интраоперационных культур для одного и того же микроорганизма во время первичной асептической ревизионной операции на протезе коленного сустава [31].

М. Людвиг и соавторы (2025) высказывают серьезную обеспокоенность существенной разницей в результатах обнаружения и классификации патогенов из образцов тканей единой группы пациентов во время предполагаемой асептической ревизионной артропластики тазобедренного и коленного суставов двумя различными лабораториями, прошедшими международную сертификацию и калибровку, так как ложноположительные результаты при интерпретации микробиологических данных ведут к дилемме, касающейся послеоперационной тактики, и возможному увеличению расходов [27]. Поскольку лабораторные результаты показали большую неопределенность, авторы настоятельно рекомендуют тщательное клиническое и гистопатологическое исследование данной когорты пациентов.

Другие авторы указывают на риск ложноотрицательных результатов при диагностике ППИ, особенно в случае проведенной ранее антибактериальной терапии, низкой бактериальной нагрузки или наличия биопленок, что ограничивает надежность культуральных методов [34–37].

Молекулярные методы, включая секвенирование, могут обеспечить более быстрое выявление возбудителя и/или улучшить идентификацию патогенов при ППИ по сравнению с традиционными культуральными исследованиями [38–40]. Метод цифровой ПЦР с использованием капель, по сравнению с ПЦР в реальном времени, продемонстрировал примерно в 10 раз более низкий предел обнаружения; представляют собой многообещающий диагностический инструмент идентификации бактериальных патогенов у пациентов с ППИ [41].

Однако, несмотря на свою многообещающую эффективность, новые молекулярные методы сталкиваются с рядом ограничений, включая высокую стоимость, длительность выполнения и трудности в разделении контаминации и истинной инфекции [42].

Таким образом, различные результаты анализа одних и тех же образцов разными лабораториями, риск ложноотрицательных и ложноположительных результатов микробиологических исследований, ограничения новых молекулярных методов вносят негативный вклад в дифференциальную диагностику ППИ и асептического расшатывания и правильность принятия решения о предоперационном лечении и постоперационной тактике [26, 40, 42, 43]. По мнению Н. Р. Миландт и соавторов (2019), до 20 % пациентов, у которых диагностировали асептическую нестабильность, в конечном счете страдают ППИ, вызванной низковирулентными возбудителями [44]. Авторы критериев Европейского общества по инфекционным заболеваниям костей и суставов (EBJIS) для ППИ подчеркивают, что гиподиагностика ППИ ведет к недостаточному лечению и серьезным последствиям, гипердиагностика – к ненужным инвазивным процедурам [45], то и другое – к экономическим потерям.

Таким образом, истинный золотой стандарт диагностики ППИ остается неопределенным [45]. В связи с давними проблемами диагностики ППИ ака-

демические сообщества предлагают использовать алгоритмы, основанные на критериях для стандартизированного определения ППИ. В последние годы были предложены новые диагностические подходы к ППИ, включая критерии Международного согласительного совещания (ICM, 2018) и трехуровневый алгоритм EBJIS, 2021, поддержанный Обществом по инфекционным заболеваниям опорно-двигательного аппарата (MSIS) [45, 46]. Однако, хотя критерии ICM (2018) и продемонстрировали более высокую диагностическую точность относительно критериев ICM (2013), часть критериев зависит от данных, доступных во время или после операции, что ограничивает их предоперационное применение [47].

Отдельные диагностические тесты критериев EBJIS (2021) также имеют ограничения по точности и интерпретации, что диктует необходимость оценивать результаты в клиническом контексте [45]. Р. Соуза и соавторы (2023) указывают, что диагностический алгоритм EBJIS (2021) более точен в исключении инфекции на предоперационном этапе, однако «случаи, классифицированные как вероятные/подтвержденные инфекции с использованием EBJIS среди тех, которые были классифицированы как неинфицированные в других определениях, показали значительно более высокий риск последующей перипротезной инфекции по сравнению с соответствующими неинфицированными случаями с использованием MSIS (RR = 3, 95% CI 1–6), но не с использованием ICM 2018 (RR = 2, CI 1–6)» [48]; обновленные алгоритмы по-прежнему недостаточно используются врачами, в том числе ввиду трудностей с точной интеграцией различных результатов и систем оценки [49], клинические обзоры также поддерживают сохраняющиеся сложности диагностики и ведения ППИ [50].

С учетом указанных выше причин в настоящее время существует острая потребность в более надежных диагностических инструментах ППИ, сочетающих высокую точность с клинической применимостью, которые помогут врачам улучшить ее раннее выявление, используя экспертные критерии. Одним из современных подходов является использование искусственного интеллекта (ИИ), который в последнее десятилетие стал трансформирующим инструментом в здравоохранении [51, 52], в том числе в области травматологии и ортопедии [53]. Использование ИИ в распознавании изображений демонстрирует перспективы улучшения диагностики [54–56].

ИИ представляет собой многоаспектный термин, включающий в себя подобласти, в том числе машинное обучение (МО) [54]. Использование ИИ в распознавании изображений улучшило клиническую диагностику, в том числе путем повышения точности рентгенологических и патологических исследований [55, 56]. МО – это «отдельное применение ИИ, способное генерировать прогнозы и уже протестированное в различных медицинских специальностях с использованием различных подходов, таких как диагностические приложения, прогнозирование затрат или выявление факторов риска» [57]. Глубокое обучение – подполе МО – активно используется в клинической обработке естественного языка и анализе медицинских текстовых данных [58]. Несколько исследований показали потенциал моделей МО в диагностике [59] и прогнозировании ППИ [59, 60], включая риск рецидива инфекции после ревизионного вмешательства [61, 62].

В. Чэнь и соавторы (2024) разработали новую диагностическую систему на основе МО в ходе ретроспективного когортного исследования осложнений после ТЭТБС, которая показала значительно более высокую диагностическую ценность для принятия хирургических решений по сравнению с общепринятыми критериями, включая определения [63]. Авторы выявили 3 наиболее важных признака из изученных, помимо показателей, входящих в общепринятые определения: время до артропластики, гипоальбуминемия и скопление жидкости в мягких тканях при компьютерной томографии. В. Чэнь и соавторы отмечают значительный потенциал системы в оказании помощи в принятии решений о хирургическом вмешательстве и постоперационной тактике и указывают на ряд ограничений в интерпретации результатов, связанных с ретроспективным характером исследования, относительно небольшой выборкой пациентов единственного клинического центра, что могло снизить надежность, устойчивость и обобщаемость данных [63].

Е. Тао и соавторы (2024) сосредоточились на повышении точности патологоанатомической диагностики ППИ с использованием ИИ; модель ResNet-50 продемонстрировала низкую диагностическую точность на уровне изображений ППИ; CNN и MobileNet v3c уступали наиболее эффективным моделям, но не были низкоточными по AUC; среди наиболее эффективных моделей EfficientNet v2-S превзошла CAMEL2 на уровне изображений, тогда как CAMEL2 показала лучшие результаты на уровне пациента [64].

Джим Парр и соавторы (2025) разработали модель МО, которая генерирует предоперационную оценку вероятности ППИ исключительно на основе биомаркеров синовиальной жидкости, в модели использовались маркеры воспаления (количество лейкоцитов, процент нейтрофилов, С-реактивный белок, альфа-дефензин) и маркеры микробных антигенов (*Staphylococcus*, *Enterococcus*, *Candida* и *Cutibacterium acnes*) [65]. Авторы утверждают, что модель значительно повысила точность диагностики, выявив связь в большинстве неопределенных случаев с инфицированными или неинфицированными паттернами, причем результат был достигнут без использования результатов посева в течение 24 ч, основываясь исключительно на биомаркерах; среди ограничений, указывают на функции, недоступные в других лабораториях, в том числе использование пяти биомаркеров прямого обнаружения микробных антигенов, без которых модель была бы значительно слабее [65].

Б. Чэнь и соавторы (2025) продолжили работу в области предоперационной диагностики ППИ путем анализа как ретроспективных предоперационных данных о сыворотке крови (процент нейтрофилов, процент лимфоцитов, тромбоциты, скорость оседания эритроцитов, С-реактивный белок, D-димер, сывороточный интерлейкин 6 и альбумин), маркерах синовиальной жидкости (процент полиморфноядерных клеток и синовиальный интерлейкин 6) и исходных данных пациентов с ППИ, включая пол, возраст, вес и индекс массы тела, так и валидации модели на основе критериев MSIS и ICM [66]. Авторы сообщают, что предоперационная диагностическая эффективность разработанной модели превзошла MSIS (2013) и ICM (2018), однако имеет ряд ограничений, среди которых использование критериев MSIS (2013) в качестве основы для диагностики, преимущественно ретроспективной одноцентровой характер исследования с участием пациентов, проживающих на юго-западе

Китая и отсутствие внешних когорт, исключение пациентов с фоновыми заболеваниями, влияющими на экспрессию воспалительных факторов, подчеркивают необходимость проведения крупномасштабных многоцентровых проспективных исследований для дальнейшей оценки точности и клинической применимости данной модели [66].

Крайне важно не только дифференцировать ППИ и асептическую нестабильность как причины развития несостоятельности протеза крупного сустава, но и прогнозировать вероятность развития ППИ в будущем путем, например, оценки предоперационных и периоперационных факторов риска. Создание такой модели МО, способной комбинированно оценивать факторы риска пациентов и делать соответствующие прогнозы, будет способствовать разработке целевых стратегий предотвращения ППИ и позволит прогнозировать риск в каждом конкретном случае. Юк Йи Чонг и соавторы (2025), собрав 60 признаков, охватывающих демографические данные пациентов, переменные, связанные с операцией, лабораторные данные и сопутствующие заболевания, отобрали 6 из них путем однофакторного и многофакторного анализа. Среди пяти моделей МО сбалансированная Random Forest продемонстрировала наилучшую прогностическую способность в отношении ППИ после первичного эндопротезирования коленного сустава. Среди выявленных факторов риска наиболее значимыми оказались: длительное время операции, мужской пол, индекс более 2 по классификации Американского общества анестезиологов, оценивающей физическое состояние пациента перед операцией, анемия в анамнезе и септический артрит в анамнезе; спинальная анестезия оказалась, напротив, защитным фактором [67].

Сербан Драгословяну и соавторы (2025), сравнив различные модели МО, выделили среди них наиболее эффективные для клинического применения в прогнозировании ППИ: Random Forest, XGBoost и KNN, обеспечивающие оптимальный баланс между точностью, достоверностью и полнотой [68].

Заключение

Успехи тотального эндопротезирования суставов и увеличение продолжительности жизни населения привели к неуклонному росту как первичных, так и, как следствие, ревизионных вмешательств на крупных суставах. ППИ остается одним из наиболее тяжелых осложнений, обусловливающих неудовлетворительные исходы эндопротезирования [69].

Диагностический потенциал традиционных подходов к выявлению ППИ ограничен отсутствием унифицированного золотого стандарта и вариабельностью эффективности существующих методов. Современные методы диагностики, включая анализ синовиальной жидкости и микробиологические посевы, обладают ограниченной чувствительностью и специфичностью, особенно в случаях инфекций с отрицательным результатом посева. Ситуацию осложняют стертые клинические проявления, ложноотрицательные результаты вследствие приема антибиотиков или неадекватного забора материала [70].

В этой связи возрастает потребность в новых диагностических технологиях, способных обеспечить быстрое и надежное выявление ППИ [69]. Технологии ИИ, основанные на машинном и глубоком обучении, открывают новые возможности для интеграции сложных клинико-лабораторных и инстру-

ментальных данных, обеспечивая более высокую диагностическую точность и эффективную поддержку врачебных решений [59].

Список литературы

1. Vorokov A. A., Bortulev P. I., Khaidarov V. M. [et al.]. Total hip and knee arthoplasty: On the issue of indications for surgery // Pediatric traumatology, orthopaedics and reconstructive surgery. 2020. Vol. 8, № 3. P. 355–363. doi: 10.17816/PTORS34164
2. Schwartz A. M., Farley K. X., Guild G. N. [et al.]. Projections and epidemiology of revision hip and knee arthroplasty in the United States to 2030 // The Journal of arthroplasty. 2020. Vol. 35, № 6. P. 79–85. doi: 10.1016/j.arth.2020.02.030
3. Shichman I., Roof M., Askew N. [et al.]. Projections and Epidemiology of Primary Hip and Knee Arthroplasty in Medicare Patients to 2040-2060 // Journal of Bone and Joint Surgery. 2023. Vol. 8, № 1. P. e22. doi: 10.2106/JBJS.OA.22.00112
4. Rupp M., Lau E., Kurtz S. M. [et al.]. Projections of primary TKA and THA in Germany from 2016 through 2040 // Clinical Orthopaedics and Related Research. 2020. Vol. 478, № 7. P. 1622–1633. doi: 10.1097/CORR.0000000000001214
5. Klug A., Gramlich Y., Rudert M. [et al.]. The projected volume of primary and revision total knee arthroplasty will place an immense burden on future health care systems over the next 30 years // Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy. 2021. Vol. 29, № 10. P. 3287–3298. doi: 10.1007/s00167-020-06154-7
6. Martinez R., Chen A. F. Outcomes in revision knee arthroplasty: preventing reoperation for infection keynote lecture - BASK annual Congress 2023 // The Knee. 2023. Vol. 43. P. A5–A10. doi: 10.1016/j.knee.2023.07.010
7. Mozella A. P., Cobra H. A. A. B., Minamoto S. T. N., Salim R., Leal A. C. Causes of Revision of Total Knee Arthroplasties in a Tertiary Hospital in Brazil // Rev Bras Ortop (Sao Paulo). 2024. Vol. 59, № 5. P. e696-e701. doi: 10.1055/s-0042-1757304
8. Hauer G., Rasic L., Klim S. [et al.]. Septic complications are on the rise and aseptic loosening has decreased in total joint arthroplasty: an updated complication based analysis using worldwide arthroplasty registers // Archives of orthopaedic and trauma surgery. 2024. Vol. 144, № 12. P. 5199–5204. doi: 10.1007/s00402-024-05379-2
9. Schroer W. C., Berend K. R., Lombardi A. V. [et al.]. Why are total knees failing today? Etiology of total knee revision in 2010 and 2011 // The Journal of arthroplasty. 2013. Vol. 28, № 8. P. 116–119. doi: 10.1016/j.arth.2013.04.056
10. Шубняков И. И., Риахи А., Денисов А. О. [и др.]. Основные тренды в эндопротезировании тазобедренного сустава на основании данных регистра артропластики НМИЦ ТО им. Р. Р. Вредена с 2007 по 2020 г. // Травматология и ортопедия России. 2021. Т. 27, № 3. С. 119–142. doi: 10.21823/2311-2905-2021-27-3-119-142
11. Jafari S. M., Coyle C., Mortazavi S. M. J. [et al.]. Revision hip arthroplasty: Infection is the most common cause of failure // Clinical Orthopaedics and Related Research. 2010. Vol. 468, № 8. P. 2046–2051. doi: 10.1007/s11999-010-1251-6
12. Шубняков И. И., Тихилов Р. М., Денисов А. О., Ахмедилов М. А., Черный А. Ж., Тотоев З. А., Джавадов А. А., Карпухин А. С., Муравьёва Ю. В. Что изменилось в структуре ревизионного эндопротезирования тазобедренного сустава в последние годы? // Травматология и ортопедия России. 2019. Vol. 25, № 4. P. 9–27. doi: 10.21823/2311-2905-2019-25-4-9-27
13. Chepeleva M. V., Chegurov O. K., Kuznetsova E. I. [et al.]. The indicators of immunity in patients with aseptic instability of knee joint // Klinicheskaia Laboratornaia Diagnostika. 2014. Vol. 59, №. 8. P. 18–21.
14. Hodges N. A., Sussman E. M., Stegemann J. P. Aseptic and septic prosthetic joint loosening: impact of biomaterial wear on immune cell function, inflammation, and infection // Biomaterials. 2021. Vol. 278. P. 121127. doi: 10.1016/j.biomaterials.2021.121127
15. Goldring S. R., Schiller A. L., Roelke M. [et al.]. The synovial-like membrane at the bone-cement interface in loose total hip replacements and its proposed role in bone lysis // Journal of Bone and Joint Surgery. 1983. Vol. 65, № 5. P. 575–584.

16. Gallo J., Goodman S. B., Konttinen Y. T. [et al.]. Osteolysis around total knee arthroplasty: A review of pathogenetic mechanisms // Acta biomaterialia. 2013. Vol. 9, № 9. P. 8046–8058. doi: 10.1016/j.actbio.2013.05.005
17. Babushkina I. V., Bondarenko A. S., Ulyanov V. Yu. [et al.]. Biofilm formation by gram-negative bacteria during implant-associated infection // Bulletin of Experimental Biology and Medicine. 2020. Vol. 169, № 3. P. 365–368. doi: 10.1007/s10517-020-04888-5
18. Rajput V., Meek R. M. D., Haddad F. S. [et al.]. Periprosthetic joint infection: what next? // The bone & joint journal. 2022. Vol. 104, № 11. P. 1193–1195. doi: 10.1302/0301-620x.104b11.Bjj-2022-0944
19. Ayoade F., Li D., Mabrouk A. [et al.]. Periprosthetic joint infection // StatPearls [Internet]. StatPearls Publishing. 2023.
20. Premkumar A., Kolin D. A., Farley K. X. [et al.]. Projected economic burden of periprosthetic joint infection of the hip and knee in the United States // The Journal of arthroplasty. 2021. Vol. 36, № 5. P. 1484–1489. doi: 10.1016/j.arth.2020.12.005
21. Reinhard J., Lang S., Walter N. [et al.]. In-hospital mortality of patients with periprosthetic joint infection // Bone & Joint Open. 2024. Vol. 5, № 4. P. 367–373. doi: 10.1302/2633-1462.54.BJO-2023-0162.R1
22. Migliorini F., Weber C. D., Bell A. [et al.]. Bacterial pathogens and in-hospital mortality in revision surgery for periprosthetic joint infection of the hip and knee: analysis of 346 patients // European journal of medical research. 2023. Vol. 28, № 1. P. 177. doi: 10.1186/s40001-023-01138-y
23. Jones M. D., Buckle C. L. How does aseptic loosening occur and how can we prevent it? // Orthopaedics and Trauma. 2020. Vol. 34, № 3. P. 146–152. doi: 10.1016/j.mporth.2020.03.008
24. Линник С. А., Оришак Е. А., Ермаков А. М. [и др.]. Роль микробиологических методов исследования при диагностике перипротезной инфекции у больных с асептической нестабильностью эндопротезов тазобедренного сустава // Гений ортопедии. 2025. Т. 31, № 4. С. 452–462. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-4-452-462
25. Liu X. K., Zhao H. X., Ding L. F. [et al.]. Microbiologic analysis of 140 patients undergoing revision total knee arthroplasty due to periprosthetic joint infection and aseptic loosening: droplet digital PCR analysis // Journal of Orthopaedic Surgery and Research. 2025. Vol. 20, № 1. P. 740. doi: 10.1186/s13018-025-06160-w
26. Li C., Renz N., Trampuz A. [et al.]. Twenty common errors in the diagnosis and treatment of periprosthetic joint infection // International orthopaedics. 2020. Vol. 44, № 1. P. 3–14. doi: 10.1007/s00264-019-04426-7
27. Ludwig M., Fuchs M., Trappe O. [et al.]. Unexpected Positive Cultures During Aseptic Hip and Knee Revision Arthroplasty: Substantial Discrepancies in Laboratory Analyses // Antibiotics. 2025. Vol. 14, № 4. P. 372. doi: 10.3390/antibiotics14040372
28. Kayani B., Mancino F., Baawa-Ameyaw J. [et al.]. Unexpected positive cultures in aseptic revision hip and knee arthroplasty // Bone & Joint Open. 2024. Vol. 5, № 10. P. 832–836. doi: 10.1302/2633-1462.510.BJO-2024-0032.R1
29. Kloos J., Vander Linden K., Vermote S. [et al.]. Prevalence, interpretation, and management of unexpected positive cultures in revision TKA: A systematic review // Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy. 2022. Vol. 30, № 12. P. 3998–4009. doi: 10.1007/s00167-021-06856-6
30. Simon S., Martalanz L., Frank B. J. H. [et al.]. Prevalence risk factors, microbiological results and clinical outcome in unexpected positive intraoperative cultures in unclear and presumed aseptic hip and knee revision arthroplasties-A ten-year retrospective analysis with a minimum follow up of 2 years // Journal of Orthopaedic Translation. 2024. Vol. 48. P. 156–162. doi: 10.1016/j.jot.2024.08.002
31. Wu C. J., Leal J., Seyler T. M. [et al.]. Unsuspected positive intraoperative cultures in aseptic revision knee arthroplasty: prevalence, management, and infection-free survi-

vorship // The Journal of Arthroplasty. 2024. Vol. 39, № 10. P. 2581–2590. doi: 10.1016/j.arth.2024.06.007
32. Николаев Н. С., Пчелова Н. Н., Преображенская Е. В. [и др.]. «Неожиданные» инфекции при асептических ревизиях // Травматология и ортопедия России. 2021. Т. 27, № 3. С. 56–70. doi: 10.21823/2311-2905-2021-27-3-56-70
33. Vargas-Reveron C., Fernandez-Valencia J., Martinez-Pastor J.C., [et al.]. Prevalence and impact of unexpected positive intraoperative cultures in total hip or knee revision surgery // The Journal of Arthroplasty. 2025. Vol. 40, № 1. P. 191–197. doi: 10.1016/j.arth.2024.07.031
34. Aliyev O., Yildiz F., Kaya H. B. [et al.]. Sonication of explants enhances the diagnostic accuracy of synovial fluid and tissue cultures and can help determine the appropriate antibiotic therapy for prosthetic joint infections // International orthopaedics. 2022. Vol. 46, № 3. P. 415–22. doi: 10.1007/s00264-021-05286-w
35. Rodriguez-Merchan E. C. The function of sonication in the diagnosis of periprosthetic joint infection after total knee arthroplasty // Archives of Bone and Joint Surgery. 2022. Vol. 10, № 9. P. 735–740. doi: 10.22038/abjs.2020.44329.2212
36. Wouthuyzen-Bakker M. Cultures in Periprosthetic Joint Infections, the Imperfect Gold Standard? // EFORT Open Reviews. 2023. Vol. 8, № 4. P. 175–179.
37. Zangiabadian M., Tadi M. J., Yousefimoghaddam F., Zangiabadian A., Jolfayi A. G. Evaluating the Effect of Therapeutic Antibiotics in Prosthetic Joint Infections Culturing: A Narrative Review // Health Sci Rep. 2026. Vol. 9, 2. P. e71799. doi: 10.1002/hsr2.71799
38. Han H. S., Ro D. H., Chung J. [et al.]. Nanopore 16S amplicon sequencing enables rapid detection of pathogen in knee periprosthetic joint infection // International Journal of Medical Microbiology. 2022. Vol. 312, № 8. P. 151570. doi: 10.1016/j.ijmm.2022.151570
39. Lin L., Li J., Zhang C., Li J., Wu B., Huang Z., Lv J., Liu M., Li W., Zhang W., Fang X. Comprehensive analysis of culture-negative periprosthetic joint infection with metagenomic next-generation sequencing // Front Cell Infect Microbiol. 2025. Vol. 15. P. 1564488. doi: 10.3389/fcimb.2025.1564488
40. Hartley J. C., Harris K. A. Molecular Techniques for Diagnosing Prosthetic Joint Infections // Journal of Antimicrobial Chemotherapy. 2014. Vol. 69, № 1. P. i21–i24. doi: 10.1093/jac/dku249
41. Tak L. J., Shin M. K., Yoo J. I. [et al.]. Development of droplet digital PCR-based detection of bacterial pathogens in prosthetic joint infection: a preliminary study using a synthesized model plasmid // Frontiers in cellular and infection microbiology. 2023. Vol. 13. P. 1301446. doi: 10.3389/fcimb.2023.1301446
42. Maritati M., De Rito G., Zanoli G. A. [et al.]. Beyond Cultures: The Evolving Role of Molecular Diagnostics, Synovial Biomarkers and Artificial Intelligence in the Diagnosis of Prosthetic Joint Infections // Journal of Clinical Medicine. 2025. Vol. 14. № 19. P. 6886. doi: 10.3390/jcm14196886
43. Huang H., Tong Y., Hu X., Liao F. K., Chen R. The application value and challenges of metagenomic next-generation sequencing in the diagnosis of periprosthetic joint infection after arthroplasty // Front Med (Lausanne). 2025. Vol. 12. P. 1686503. doi: 10.3389/fmed.2025.1686503
44. Milandt N. R., Gundtoft P. H., Overgaard S. A single positive tissue culture increases the risk of rerevision of clinically aseptic THA: a national register study // Clinical Orthopaedics and Related Research. 2019. Vol. 477, № 6. P. 1372–1381. doi: 10.1097/CORR.0000000000000609
45. McNally M., Sousa R., Wouthuyzen-Bakker M. [et al.]. The EBJIS definition of periprosthetic joint infection // The bone & joint journal. 2021. Vol. 103, № 1. P. 18–25. doi: 10.1302/0301-620X.103B1.BJJ-2020-1381.R1

46. Parvizi J., Tan T. L., Goswami K. [et al.]. The 2018 definition of periprosthetic hip and knee infection: an evidence-based and validated criteria // The Journal of arthroplasty. 2018. Vol. 33, № 5. P. 1309–1314. doi: 10.1016/j.arth.2018.02.078
47. Tripathi S., Tarabichi S., Parvizi J. [et al.]. Current relevance of biomarkers in diagnosis of periprosthetic joint infection: an update // Arthroplasty. 2023. Vol. 5, № 1. P. 41. doi: 10.1186/s42836-023-00192-5
48. Sousa R., Ribau A., Alfaro P. [et al.]. The European bone and joint infection society definition of periprosthetic joint infection is meaningful in clinical practice: a multicentric validation study with comparison with previous definitions // Acta Orthopaedica. 2023. Vol. 94. P. 8–18. doi: 10.2340/17453674.2023.5670
49. Deirmengian C., McLaren A., Higuera C. [et al.]. Physician use of multiple criteria to diagnose periprosthetic joint infection may be less accurate than the use of an individual test // Cureus. 2022. Vol. 14, № 11. P. 31418. doi: 10.7759/cureus.31418
50. Nelson S. B., Pinkney J. A., Chen A. F. [et al.]. Periprosthetic joint infection: current clinical challenges // Clinical Infectious Diseases. 2023. Vol. 77, № 7. P. 34–45. doi: 10.1093/cid/ciad360
51. Gorecki G. P., Tomescu D. R., Pleș L. [et al.]. Implications of using artificial intelligence in the diagnosis of sepsis/sepsis shock // Germs. 2024. Vol. 14, № 1. P. 77–84. doi: 10.18683/germs.2024.1419
52. Lin T. H., Chung H. Y., Jian M. J. [et al.]. AI-driven innovations for early sepsis detection by combining predictive accuracy with blood count analysis in an emergency setting: retrospective study // Journal of Medical Internet Research. 2025. Vol. 27. P. e56155. doi: 10.2196/56155
53. Farhadi F., Barnes M. R., Sugito H. R. [et al.]. Applications of artificial intelligence in orthopaedic surgery // Frontiers in medical technology. 2022. Vol. 4. P. 995526. doi: 10.3389/fmedt.2022.995526
54. Hsiao Y. J., Wen Y. C., Lai W. Y. [et al.]. Application of artificial intelligence-driven endoscopic screening and diagnosis of gastric cancer // World journal of gastroenterology. 2021. Vol. 27, № 22. P. 2979–2993. doi: 10.3748/wjg.v27.i22.2979
55. Sharma P., Hassan C. Artificial intelligence and deep learning for upper gastrointestinal neoplasia // Gastroenterology. 2022. Vol. 162, № 4. P. 1056–1066. doi: 10.1053/j.gastro.2021.11.040
56. Myers T. G., Ramkumar P. N., Ricciardi B. F. [et al.]. Artificial intelligence and orthopaedics: An introduction for clinicians // Journal of Bone and Joint Surgery. 2020. Vol. 102, № 9. P. 830–840. doi: 10.2106/JBJS.19.01128
57. Hinterwimmer F., Lazic I., Suren C. [et al.]. Machine learning in knee arthroplasty: Specific data are key – A systematic review // Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy. 2022. Vol. 30, № 2. P. 376–388. doi: 10.1007/s00167-021-06848-6
58. Wu S., Roberts K., Datta S. [et al.]. Deep learning in clinical natural language processing: a methodical review // Journal of the American Medical Informatics Association. 2020. Vol. 27, № 3. P. 457–470. doi: 10.1093/jamia/ocz200.
59. Li P., Wang Y., Zhao R. [et al.]. The Application of Artificial Intelligence in Periprosthetic Joint Infection // Journal of Advanced Research. 2025. Vol. 79. P. 633–659. doi: 10.1016/j.jare.2025.03.039 PMID: 40158619; PMCID: PMC12766198
60. Vulpe D. E., Anghel C., Scheau C., Dragosloveanu S., Săndulescu O. Artificial Intelligence and Its Role in Predicting Periprosthetic Joint Infections // Biomedicines. 2025. Vol. 13, № 8. P. 1855. doi: 10.3390/biomedicines13081855
61. Klemt C., Laurencin S., Uzosike A. C. [et al.]. Machine learning models accurately predict recurrent infection following revision total knee arthroplasty for periprosthetic joint infection // Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy. 2022. Vol. 30, № 8. P. 2582–2590. doi: 10.1007/s00167-021-06794-3
62. Wouthuyzen-Bakker M., Shohat N., Parvizi J. [et al.]. Risk scores and machine learning to identify patients with acute periprosthetic joints infections that will likely fail classi-

cal irrigation and debridement // Frontiers in Medicine. 2021. Vol. 8. P. 550095. doi: 10.3389/fmed.2021.550095
63. Chen W., Hu X., Gu C. [et al.]. A machine learning-based model for "In-time" prediction of periprosthetic joint infection // Digital Health. 2024. Vol. 10. P. 20552076241253531. doi: 10.1177/20552076241253531
64. Tao Y., Luo Y., Hu H. [et al.]. Clinically applicable optimized periprosthetic joint infection diagnosis via AI based pathology // npj Digital Medicine. 2024. Vol. 7, № 1. P. 303. doi: 10.1038/s41746-024-01301-7
65. Parr J., Thai-Paquette V., Paranjape P. [et al.]. Probability score for the diagnosis of periprosthetic joint infection: development and validation of a practical multi-analyte machine learning model // Cureus. 2025. Vol. 17, № 5. P. e84055. doi: 10.7759/cureus.84055
66. Chen B., Yang Y., Zhou H. [et al.]. Machine Learning Strategies for Preoperative PJI Diagnosis: Integrative Analysis of Serum and Synovial Fluid Markers // Journal of Inflammation Research. 2025. Vol. 18. P. 10253–10265. doi: 10.2147/JIR.S499903
67. Chong Y. Y., Lau C. M. L., Jiang T. [et al.]. Predicting periprosthetic joint infection in primary total knee arthroplasty: a machine learning model integrating preoperative and perioperative risk factors // BMC Musculoskeletal Disorders. 2025. Vol. 26, № 1. P. 241. doi: 10.1186/s12891-025-08296-6
68. Dragosloveanu S., Vulpe D. E., Andrei C. A. [et al.]. Predicting periprosthetic joint Infection: Evaluating supervised machine learning models for clinical application // Journal of Orthopaedic Translation. 2025. Vol. 54. P. 51–64. doi: 10.1016/j.jot.2025.06.016
69. Magruder M. L., Heckmann N. D., Lieberman J. R. [et al.]. Novel Technologies in Periprosthetic Joint Infections: Emerging Therapeutics // The Journal of arthroplasty. 2025. Vol. 41, № 2. P. 560–568. doi: 10.1016/j.arth.2025.08.002
70. Qin L., Li X., Wang J. [et al.]. Improved diagnosis of chronic hip and knee prosthetic joint infection using combined serum and synovial IL-6 tests // Bone & joint research. 2020. Vol. 9, № 9. P. 587–592. doi: 10.1302/2046-3758.99.BJR-2020-0095

References

1. Vorokov A.A., Bortulev P.I., Khaidarov V.M. et al. Total hip and knee arthoplasty: On the issue of indications for surgery. *Pediatric traumatology, orthopaedics and reconstructive surgery*. 2020;8(3):355–363. doi: 10.17816/PTORS34164
2. Schwartz A.M., Farley K.X., Guild G.N. et al. Projections and epidemiology of revision hip and knee arthroplasty in the United States to 2030. *The Journal of arthroplasty*. 2020;35(6):79–85. doi: 10.1016/j.arth.2020.02.030
3. Shichman I., Roof M., Askew N. et al. Projections and Epidemiology of Primary Hip and Knee Arthroplasty in Medicare Patients to 2040-2060. *Journal of Bone and Joint Surgery*. 2023;8(1):ye22. doi: 10.2106/JBJS.OA.22.00112
4. Rupp M., Lau E., Kurtz S.M. et al. Projections of primary TKA and THA in Germany from 2016 through 2040. *Clinical Orthopaedics and Related Research*. 2020;478(7):1622–1633. doi: 10.1097/CORR.0000000000001214
5. Klug A., Gramlich Y., Rudert M. et al. The projected volume of primary and revision total knee arthroplasty will place an immense burden on future health care systems over the next 30 years. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. 2021;29(10):3287–3298. doi: 10.1007/s00167-020-06154-7
6. Martinez R., Chen A.F. Outcomes in revision knee arthroplasty: preventing reoperation for infection keynote lecture – BASK annual Congress 2023. *The Knee*. 2023;43:A5–A10. doi: 10.1016/j.knee.2023.07.010
7. Mozella A.P., Cobra H.A.A.B., Minamoto S.T.N., Salim R., Leal A.C. Causes of Revision of Total Knee Arthroplasties in a Tertiary Hospital in Brazil. *Rev Bras Ortop (Sao Paulo)*. 2024;59(5):e696-e701. doi: 10.1055/s-0042-1757304
8. Hauer G., Rasic L., Klim S. et al. Septic complications are on the rise and aseptic loosening has decreased in total joint arthroplasty: an updated complication based analysis

using worldwide arthroplasty registers. *Archives of orthopaedic and trauma surgery*. 2024;144(12):5199–5204. doi: 10.1007/s00402-024-05379-2
9. Schroer W.C., Berend K.R., Lombardi A.V. et al. Why are total knees failing today? Etiology of total knee revision in 2010 and 2011. *The Journal of arthroplasty*. 2013;28(8):116–119. doi: 10.1016/j.arth.2013.04.056
10. Shubnyakov I.I., Riakhi A., Denisov A.O. et al. Key trends in hip arthroplasty based on the R.R. Vreden National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics' Arthroplasty registry from 2007 to 2020. *Travmatologiya i ortopediya Rossii = Traumatology and orthopedics in Russia*. 2021;27(3):119–142. (In Russ.). doi: 10.21823/2311-2905-2021-27-3-119-142
11. Jafari S.M., Coyle C., Mortazavi S.M.J. et al. Revision hip arthroplasty: Infection is the most common cause of failure. *Clinical Orthopaedics and Related Research*. 2010;468(8):2046–2051. doi: 10.1007/s11999-010-1251-6
12. Shubnyakov I.I., Tikhilov R.M., Denisov A.O., Akhmedilov M.A., Chernyy A.Zh., Totoyev Z.A., Dzhavadov A.A., Karpukhin A.S., Muravyova Yu.V. What has changed in the structure of revision hip arthroplasty in recent years? *Travmatologiya i ortopediya Rossii = Traumatology and Orthopedics of Russia*. 2019;25(4):9–27. (In Russ.). doi: 10.21823/2311-2905-2019-25-4-9-27
13. Shepeleva M.V., Shegurov O.K., Kuznetsova E.I. et al. The indicators of immunity in patients with aseptic instability of knee joint. *Klinicheskaia Laboratornaia Diagnostika = Clinical Laboratory Diognostics*. 2014;59(8):18–21. (In Russ.)
14. Hodges N.A., Sussman E.M., Stegemann J.P. Aseptic and septic prosthetic joint loosening: impact of biomaterial wear on immune cell function, inflammation, and infection. *Biomaterials*. 2021;278:121127. doi: 10.1016/j.biomaterials.2021.121127
15. Goldring S.R., Schiller A.L., Roelke M. et al. The synovial-like membrane at the bone-cement interface in loose total hip replacements and its proposed role in bone lysis. *Journal of Bone and Joint Surgery*. 1983;65(5):575–584.
16. Gallo J., Goodman S.B., Konttinen Y.T. et al. Osteolysis around total knee arthroplasty: A review of pathogenetic mechanisms. *Acta biomaterialia*. 2013;9(9):8046–8058. doi: 10.1016/j.actbio.2013.05.005
17. Babushkina I.V., Bondarenko A.S., Ulyanov V.Yu. et al. Biofilm formation by gram-negative bacteria during implant-associated infection. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*. 2020;169(3):365–368. doi: 0.1007/s10517-020-04888-5
18. Rajput V., Meek R.M.D., Haddad F.S. et al. Periprosthetic joint infection: what next? *The bone & joint journal*. 2022;104(11):1193–1195. doi: 10.1302/0301-620x.104b11.Bjj-2022-0944
19. Ayoade F., Li D., Mabrouk A. et al. Periprosthetic joint infection. *StatPearls [Internet*]. StatPearls Publishing, 2023.
20. Premkumar A., Kolin D.A., Farley K.X. et al. Projected economic burden of periprosthetic joint infection of the hip and knee in the United States. *The Journal of arthroplasty*. 2021;36(5):1484–1489. doi: 10.1016/j.arth.2020.12.005
21. Reinhard J., Lang S., Walter N. et al. In-hospital mortality of patients with periprosthetic joint infection. *Bone & Joint Open*. 2024;5(4):367–373. doi: 10.1302/2633-1462.54.BJO-2023-0162.R1
22. Migliorini F., Weber C.D., Bell A. et al. Bacterial pathogens and in-hospital mortality in revision surgery for periprosthetic joint infection of the hip and knee: analysis of 346 patients. *European journal of medical research*. 2023;28(1):177. doi: 10.1186/s40001-023-01138-y
23. Jones M.D., Buckle C.L. How does aseptic loosening occur and how can we prevent it? *Orthopaedics and Trauma*. 2020;34(3):146–152. doi: 10.1016/j.mporth.2020.03.008
24. Linnik S.A., Orishak E.A., Yermakov A.M. et al. The role of microbiological research methods in the diagnosis of periprosthetic infection in patients with aseptic instability of hip joint endoprostheses. *Geniy ortopedii = Orthopedic genius*. 2025;31(4):452–462. (In Russ.). doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-4-452-462

25. Liu X.K., Zhao H.X., Ding L.F. et al. Microbiologic analysis of 140 patients undergoing revision total knee arthroplasty due to periprosthetic joint infection and aseptic loosening: droplet digital PCR analysis. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*. 2025;20(1):740. doi: 10.1186/s13018-025-06160-w
26. Li C., Renz N., Trampuz A. et al. Twenty common errors in the diagnosis and treatment of periprosthetic joint infection. *International orthopaedics*. 2020;44(1):3–14. doi: 10.1007/s00264-019-04426-7
27. Ludwig M., Fuchs M., Trappe O. et al. Unexpected Positive Cultures During Aseptic Hip and Knee Revision Arthroplasty: Substantial Discrepancies in Laboratory Analyses. *Antibiotics*. 2025;14(4):372. doi: 10.3390/antibiotics14040372
28. Kayani B., Mancino F., Baawa-Ameyaw J. et al. Unexpected positive cultures in aseptic revision hip and knee arthroplasty. *Bone & Joint Open*. 2024;5(10):832–836. doi: 10.1302/2633-1462.510.BJO-2024-0032.R1
29. Kloos J., Vander Linden K., Vermote S. et al. Prevalence, interpretation, and management of unexpected positive cultures in revision TKA: A systematic review. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. 2022;30(12):3998–4009. doi: 10.1007/s00167-021-06856-6
30. Simon S., Martalanz L., Frank B.J.H. et al. Prevalence risk factors, microbiological results and clinical outcome in unexpected positive intraoperative cultures in unclear and presumed aseptic hip and knee revision arthroplasties-A ten-year retrospective analysis with a minimum follow up of 2 years. *Journal of Orthopaedic Translation*. 2024;48:156–162. doi: 10.1016/j.jot.2024.08.002
31. Wu C.J., Leal J., Seyler T.M. et al. Unsuspected positive intraoperative cultures in aseptic revision knee arthroplasty: prevalence, management, and infection-free survivorship. *The Journal of Arthroplasty*. 2024;39(10):2581–2590. doi: 10.1016/j.arth.2024.06.007
32. Nikolayev N.S., Pchelova N.N., Preobrazhenskaya E.V. et al. “Unexpected” infections during aseptic revisions. *Travmatologiya i ortopediya Rossii = Traumatology and orthopedics in Russia*. 2021;27(3):56–70. (In Russ.). doi: 10.21823/2311-2905-2021-27-3-56-70
33. Vargas-Reveron C., Fernandez-Valencia J., Martinez-Pastor J.C. et al. Prevalence and impact of unexpected positive intraoperative cultures in total hip or knee revision surgery. *The Journal of Arthroplasty*. 2025;40(1):191–197. doi: 10.1016/j.arth.2024.07.031
34. Aliyev O., Yildiz F., Kaya H.B. et al. Sonication of explants enhances the diagnostic accuracy of synovial fluid and tissue cultures and can help determine the appropriate antibiotic therapy for prosthetic joint infections. *International orthopaedics*. 2022;46(3):415–22. doi: 10.1007/s00264-021-05286-w
35. Rodriguez-Merchan E.C. The function of sonication in the diagnosis of periprosthetic joint infection after total knee arthroplasty. *Archives of Bone and Joint Surgery*. 2022;10(9):735–740. doi: 10.22038/abjs.2020.44329.2212
36. Wouthuyzen-Bakker M. Cultures in Periprosthetic Joint Infections, the Imperfect Gold Standard? *EFORT Open Reviews*. 2023;8(4):175–179.
37. Zangiabadian M., Tadi M.J., Yousefimoghaddam F., Zangiabadian A., Jolfayi A.G. Evaluating the Effect of Therapeutic Antibiotics in Prosthetic Joint Infections Culturing: A Narrative Review. *Health Sci Rep*. 2026;9(2):e71799. doi: 10.1002/hsr2.71799
38. Han H.S., Ro D.H., Chung J. et al. Nanopore 16S amplicon sequencing enables rapid detection of pathogen in knee periprosthetic joint infection. *International Journal of Medical Microbiology*. 2022;312(8):151570. doi: 10.1016/j.ijmm.2022.151570
39. Lin L., Li J., Zhang C., Li J., Wu B., Huang Z., Lv J., Liu M., Li W., Zhang W., Fang X. Comprehensive analysis of culture-negative periprosthetic joint infection with metagenomic next-generation sequencing. *Front Cell Infect Microbiol*. 2025;15:1564488. doi: 10.3389/fcimb.2025.1564488
40. Hartley J.C., Harris K.A. Molecular Techniques for Diagnosing Prosthetic Joint Infections. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*. 2014;69(1):i21–i24. doi: 10.1093/jac/dku249

41. Tak L.J., Shin M.K., Yoo J.I. et al. Development of droplet digital PCR-based detection of bacterial pathogens in prosthetic joint infection: a preliminary study using a synthesized model plasmid. *Frontiers in cellular and infection microbiology*. 2023;13:1301446. doi: 10.3389/fcimb.2023.1301446
42. Maritati M., De Rito G., Zanoli G.A. et al. Beyond Cultures: The Evolving Role of Molecular Diagnostics, Synovial Biomarkers and Artificial Intelligence in the Diagnosis of Prosthetic Joint Infections. *Journal of Clinical Medicine*. 2025;14(14):6886. doi: 10.3390/jcm14196886
43. Huang H., Tong Y., Hu X., Liao F.K., Chen R. The application value and challenges of metagenomic next-generation sequencing in the diagnosis of periprosthetic joint infection after arthroplasty. *Front Med (Lausanne)*. 2025;12:1686503. doi: 10.3389/fmed.2025.1686503
44. Milandt N.R., Gundtoft P.H., Overgaard S. A single positive tissue culture increases the risk of rerevision of clinically aseptic THA: a national register study. *Clinical Orthopaedics and Related Research*. 2019;477(6):1372–1381. doi: 10.1097/CORR.0000000000000609
45. McNally M., Sousa R., Wouthuyzen-Bakker M. et al. The EBJIS definition of periprosthetic joint infection. *The bone & joint journal*. 2021;103(1):18–25. doi: 10.1302/0301-620X.103B1.BJJ-2020-1381.R1
46. Parvizi J., Tan T.L., Goswami K. et al. The 2018 definition of periprosthetic hip and knee infection: an evidence-based and validated criteria. *The Journal of arthroplasty*. 2018;33(5):1309–1314. doi: 10.1016/j.arth.2018.02.078
47. Tripathi S., Tarabichi S., Parvizi J. et al. Current relevance of biomarkers in diagnosis of periprosthetic joint infection: an update. *Arthroplasty*. 2023;5(1):41. doi: 10.1186/s42836-023-00192-5
48. Sousa R., Ribau A., Alfaro P. et al. The European bone and joint infection society definition of periprosthetic joint infection is meaningful in clinical practice: a multicentric validation study with comparison with previous definitions. *Acta Orthopaedica*. 2023;94:8–18. doi: 10.2340/17453674.2023.5670
49. Deirmengian C., McLaren A., Higuera C. et al. Physician use of multiple criteria to diagnose periprosthetic joint infection may be less accurate than the use of an individual test. *Cureus*. 2022;14(11):31418. doi: 10.7759/cureus.31418
50. Nelson S.B., Pinkney J.A., Chen A.F. et al. Periprosthetic joint infection: current clinical challenges. *Clinical Infectious Diseases*. 2023;77(7):34–45. doi: 10.1093/cid/ciad360
51. Gorecki G.P., Tomescu D.R., Pleș L. et al. Implications of using artificial intelligence in the diagnosis of sepsis/sepsis shock. *Germs*. 2024;14(1):77–84. doi: 10.18683/germs.2024.1419
52. Lin T.H., Chung H.Y., Jian M.J. et al. AI-driven innovations for early sepsis detection by combining predictive accuracy with blood count analysis in an emergency setting: retrospective study. *Journal of Medical Internet Research*. 2025;27:e56155. doi: 10.2196/56155
53. Farhadi F., Barnes M.R., Sugito H.R. et al. Applications of artificial intelligence in orthopaedic surgery. *Frontiers in medical technology*. 2022;4:995526. doi: 10.3389/fmedt.2022.995526
54. Hsiao Y.J., Wen Y.C., Lai W.Y. et al. Application of artificial intelligence-driven endoscopic screening and diagnosis of gastric cancer. *World journal of gastroenterology*. 2021;27(22):2979–2993. doi: 10.3748/wjg.v27.i22.2979
55. Sharma P., Hassan C. Artificial intelligence and deep learning for upper gastrointestinal neoplasia. *Gastroenterology*. 2022;162(4):1056–1066. doi: 10.1053/j.gastro.2021.11.040
56. Myers T.G., Ramkumar P.N., Ricciardi B.F. et al. Artificial intelligence and orthopaedics: An introduction for clinicians. *Journal of Bone and Joint Surgery*. 2020;102(9):830–840. doi: 10.2106/JBJS.19.01128

57. Hinterwimmer F., Lazic I., Suren C. et al. Machine learning in knee arthroplasty: Specific data are key—A systematic review. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. 2022;30(2):376–388. doi: 10.1007/s00167-021-06848-6
58. Wu S., Roberts K., Datta S. et al. Deep learning in clinical natural language processing: a methodical review. *Journal of the American Medical Informatics Association*. 2020;27(3):457–470. doi: 10.1093/jamia/ocz200
59. Li P., Wang Y., Zhao R. et al. The Application of Artificial Intelligence in Periprosthetic Joint Infection. *Journal of Advanced Research*. 2025;79:633–659. doi: 10.1016/j.jare.2025.03.039 PMID: 40158619; PMCID: PMC12766198.
60. Vulpe D.E., Anghel C., Scheau C., Dragosloveanu S., Săndulescu O. Artificial Intelligence and Its Role in Predicting Periprosthetic Joint Infections. *Biomedicines*. 2025;13(8):1855. doi: 10.3390/biomedicines13081855
61. Klemt C., Laurencin S., Uzosike A.C. et al. Machine learning models accurately predict recurrent infection following revision total knee arthroplasty for periprosthetic joint infection. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. 2021;30(8):2582–2590. doi: 10.1007/s00167-021-06794-3
62. Wouthuyzen-Bakker M., Shohat N., Parvizi J. et al. Risk scores and machine learning to identify patients with acute periprosthetic joints infections that will likely fail classical irrigation and debridement. *Frontiers in Medicine*. 2021;8:550095. doi: 10.3389/fmed.2021.550095
63. Chen W., Hu X., Gu C. et al. A machine learning-based model for "In-time" prediction of periprosthetic joint infection. *Digital Health*. 2024;10:20552076241253531. doi: 10.1177/20552076241253531
64. Tao Y., Luo Y., Hu H. et al. Clinically applicable optimized periprosthetic joint infection diagnosis via AI based pathology. *npj Digital Medicine*. 2024;7(1):303. doi: 10.1038/s41746-024-01301-7
65. Parr J., Thai-Paquette V., Paranjape P. et al. Probability score for the diagnosis of periprosthetic joint infection: development and validation of a practical multi-analyte machine learning model. *Cureus*. 2025;17(5):e84055. doi: 10.7759/cureus.84055
66. Chen B., Yang Y., Zhou H. et al. Machine Learning Strategies for Preoperative PJI Diagnosis: Integrative Analysis of Serum and Synovial Fluid Markers. *Journal of Inflammation Research*. 2025;18:10253–10265. doi: 10.2147/JIR.S499903
67. Chong Y.Y., Lau C.M.L., Jiang T. et al. Predicting periprosthetic joint infection in primary total knee arthroplasty: a machine learning model integrating preoperative and perioperative risk factors. *BMC Musculoskeletal Disorders*. 2025;26(1):241. doi: 10.1186/s12891-025-08296-6
68. Dragosloveanu S., Vulpe D.E., Andrei C.A. et al. Predicting periprosthetic joint Infection: Evaluating supervised machine learning models for clinical application. *Journal of Orthopaedic Translation*. 2025;54:51–64. doi: 10.1016/j.jot.2025.06.016
69. Magruder M.L., Heckmann N.D., Lieberman J.R. et al. Novel Technologies in Periprosthetic Joint Infections: Emerging Therapeutics. *The Journal of arthroplasty*. 2025;41(2):560–568. doi: 10.1016/j.arth.2025.08.002
70. Qin L., Li X., Wang J. et al. Improved diagnosis of chronic hip and knee prosthetic joint infection using combined serum and synovial IL-6 tests. *Bone & joint research*. 2020;9(9):587–592. doi: 10.1302/2046-3758.99.BJR-2020-0095

Информация об авторах / Information about the authors

Яков Петрович Моисеев
аспирант, Медицинский институт, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: moiseev.yakov26@gmail.com

Yakov P. Moiseev
Postgraduate student, Medical Institute, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Кирилл Васильевич Сидорук
заведующий травматологическим отделением, врач травматолог-ортопед, Университетский клинический центр имени В. В. Виноградова (филиал) Российского университета дружбы народов имени Патриса Лумумбы (Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 61)

E-mail: sidoruk_kv@pfur.ru

Kirill V. Sidoruk
Head of the traumatology department, orthopedic traumatologist, V.V. Vinogradov University Clinical Center, branch of RUDN University (61 Vavilova street, Moscow, Russia)

Ксения Вадимовна Полонская
кандидат медицинских наук, доцент кафедры анатомии человека, Медицинский институт, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: ksen-pol@mail.ru

Kseniya V. Polonskaya
Candidate of medical sciences, associate professor of the sub-department of human anatomy, Medical Institute, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Александр Евгеньевич Ватанин
студент, Медицинский институт, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: sasavatanin2002@gmail.com

Aleksandr E. Vatanin
Student, Medical Institute, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Александр Николаевич Митрошин
доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой хирургии, директор Медицинского института, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: an-mitroshin@mail.ru

Aleksandr N. Mitroshin
Doctor of medical sciences, professor, head of the sub-department of surgery, director of Medical Institute, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 17.01.2026

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 20.02.2026

Принята к публикации / Accepted 03.03.2026