

ПРОБЛЕМЫ БИОСОВМЕСТИМОСТИ И ВЫЖИВАЕМОСТИ ЭНДОПРОТЕЗОВ СУСТАВОВ В ОРГАНИЗМЕ ЧЕЛОВЕКА: ВЗГЛЯД ТРАВМАТОЛОГА-ОРТОПЕДА



Ю. М. Чернякова¹, А. В. Зенченко^{1,2}, С. А. Костов²

¹Гомельский государственный медицинский университет, Гомель, Беларусь

²Гомельская областная клиническая больница, Гомель, Беларусь

Совершенствование материалов и конструкций эндопротезов суставов привело к улучшению выживаемости имплантатов в организме человека. Вместе с тем актуальными и требующими своего решения остаются проблемы износа пар трения, асептического расшатывания имплантатов, недостаточной биосовместимости материалов и отсутствия остеоинтеграции компонентов эндопротезов.

Ключевые слова: эндопротезирование суставов, эндопротезы суставов, износ эндопротезов, асептическая нестабильность

Для цитирования: Чернякова, Ю. М. Проблемы биосовместимости и выживаемости эндопротезов суставов в организме человека: взгляд травматолога-ортопеда / Ю. М. Чернякова, А. В. Зенченко, С. А. Костов // Журнал Гродненского государственного медицинского университета. 2026. Т. 24, № 4. С. 398-405. <https://doi.org/10.25298/2221-8785-2026-24-4-398-405>

Введение

Рост количества ежегодно выполняемых во всем мире операций эндопротезирования суставов обусловлен увеличением продолжительности жизни людей, совершенствованием и доступностью ортопедических имплантатов. Данные национальных регистров разных стран из года в год демонстрируют улучшение результатов лечения пациентов, снижение частоты ревизионных операций и более длительный срок службы первичных имплантатов [1–4]. Показатели десятилетней выживаемости современных эндопротезов составляют от 70% у пациентов молодого возраста до 93–98% у пожилых и демонстрируют хотя и временное, но удовлетворительное функционирование искусственных суставов [1–3, 5, 6].

Устанавливаемые в организм человека при повреждениях и заболеваниях суставов эндопротезы являются изделиями медицинского назначения, к конструкциям и материалам которых предъявляются особые требования. Так, эндопротез сустава должен быть совместимым с костной тканью и обеспечивать функцию аналогичную функции естественного сустава, быть химически стабильным и не оказывать токсического действия на организм человека, выдерживать большие и разнонаправленные механические нагрузки, не подвергаться коррозии и не вызывать иммунных реакций и воспаления, не способствовать опухолевому росту [7, 8].

Вопреки постоянному стремлению разработчиков материалов и производителей конструкций эндопротезов максимально соответствовать перечисленным требованиям, эндопротез сустава остается инородным телом в организме человека, а существующие ортопедические имплантаты отличаются лишь степенью отрицательного влияния на организм и вызываемой ими тканевой реакции.

Помимо качества используемых материалов, срок службы эндопротеза определяется влиянием таких факторов, как работа хирурга (техника

и точность имплантации), биологическая реакция организма пациента на имплантат, состояние пациента в аспекте превышения нормальной массы тела и интенсивных физических нагрузок [7]. В то же время практика показывает, что даже после технически идеально выполненной операции с течением времени происходит износ компонентов эндопротеза и развивается его нестабильность, одновременно возможно развитие воспаления и инфекционных осложнений в области вмешательства, что требует замены или полного удаления имплантата. В ходе долгосрочных наблюдений и систематизации исходов и неудач эндопротезирования удается установить факторы с высокой вероятностью являющиеся причинами временной и даже неудовлетворительной выживаемости эндопротезов суставов в организме человека.

Технические и медико-биологические ограничения бессрочного функционирования эндопротезов суставов

Материалы для эндопротезов суставов, их качество и совместимость друг с другом призваны обеспечивать максимально долгое функционирование имплантата и регламентируются международными стандартами. В соответствии с ними к компонентам эндопротезов предъявляются строгие требования [7]:

- скользящие поверхности сферических металлических или керамических компонентов (головок) тотальных эндопротезов, сочленяющиеся с компонентами из сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ), не должны иметь индекс шероховатости, превышающий 0,05 мкм;

- при использовании в конструкциях двух разнородных металлов или сплавов, или одного металла или сплава с различной микроструктурой, их комбинации не должны вызывать гальванические эффекты;

- пары материалов для изготовления суставных поверхностей эндопротезов должны быть

подходящими друг к другу (признаны подходящими на основании удовлетворительного применения – подтверждены установкой не менее 500 имплантатов с зафиксированным удовлетворительным результатом их клинического применения не менее 5 лет).

Подходящими сочетаниями материалов отдельных марок для суставных поверхностей имплантатов признаны: ковкая нержавеющая сталь / СВМПЭ; ковкая высокоазотистая нержавеющая сталь / СВМПЭ; кобальт-хром-молибденовый литейный сплав / СВМПЭ; ковкий кобальт-хром-вольфрам-никелевый сплав / СВМПЭ; ковкий и деформированный в холодном состоянии кобальт-хром-никель-молибден-железный сплав / СВМПЭ; керамические материалы на основе алюминия / СВМПЭ; керамические материалы на основе циркония / СВМПЭ; керамические материалы на основе алюминия; и некоторые другие.

В свою очередь даже подходящие друг к другу материалы для пар трения эндопротезов имеют свои достоинства и недостатки (табл. 1), и должны подбираться индивидуально, с учетом особенностей организма и двигательной активности пациента [9, 10].

Неподходящими друг к другу материалами для суставных поверхностей эндопротезов являются нержавеющая сталь / сплав на основе титана; нержавеющая сталь / нержавеющая сталь; нержавеющая сталь / нелегированный титан; нержавеющая сталь / сплавы на основе кобальта; нелегированный титан / нелегированный титан; нелегированный титан / сплавы на основе кобальта; нелегированный титан / СВМПЭ; и некоторые другие. Несмотря на небольшую стоимость и достаточно медленный износ металлических пар трения (10 мкм/год), из-за неблагоприятных местных реакций, ассоциированных с частицами и ионами металлов (псевдоопухоли, васкулиты, металлоз), в современных конструкциях эндопротезов их не используют [11, 12].

Для создания шарнирных соединений в эндопротезах неподходящими сочетаниями ме-

таллов являются нержавеющая сталь / сплавы на основе кобальта; нержавеющая сталь / нелегированный титан.

Срок службы эндопротезов суставов определяется временем износа пары трения, накоплением продуктов износа и вызываемых ими реакций с развитием остеолита и асептического расшатывания [13, 14]. Износ материалов в современных парах трения эндопротезов идет достаточно медленно, преимущественно за счет истирания вкладышей из СВМПЭ. При этом исследователи отмечают различные механизмы износа [15, 16]. Адгезионный износ с образованием микрочастиц полиэтилена размером от 0,1 до 10 мкм округлой и пластинчатой формы происходит в процессе контактного взаимодействия – прилипания поверхностей полимерного вкладыша и металлической головки и последующего разрыва этого контакта при движении. Абразивный износ с образованием полимерной микростружки размером менее 1 мкм наблюдается при срезании поверхности вкладыша неровностями на поверхности металлической головки или частицами третьего тела (костного цемента, кости и др.). Усталостный износ вкладыша в результате высоких напряжений полимерного материала сопровождается появлением трещин на глубине нескольких миллиметров, распространяющихся параллельно поверхности трения, с отслоением частиц в виде чешуек размером более 10 мкм. Адгезионный и абразивный износ происходит в эндопротезах тазобедренного сустава, имеющих конгруэнтные поверхности трения. Усталостный износ вкладыша характерен для не абсолютно конгруэнтных эндопротезов коленного сустава. В эндопротезах плечевого сустава сочетаются все механизмы износа.

Несмотря на экспериментально установленную и прогнозируемую скорость износа материалов в парах трения, следует учитывать, что истирание СВМПЭ может происходить неравномерно и ускоряется в более нагружаемых местах, при установке компонентов в анатомически неправильном положении, избыточном весе пациента, а также и из-за деградации полимера вследствие окисления синовиальной жидкостью [15].

Таблица 1 – Достоинства и недостатки некоторых современных пар трения эндопротезов суставов
Table 1 – Advantages and disadvantages of some modern friction pairs of joint endoprotheses

Материал в паре трения головка/вкладыш	Достоинство	Недостаток	Скорость износа, мкм/год
Керамика/керамика	- биоинертны; - обладают высокой износостойкостью; - могут иметь головки большого диаметра	- хрупкие, возможны переломы; - высокая стоимость; - могут издавать стук или скрип при движениях	<1
Керамика/СВМПЭ	- оптимальный по цене и качеству вариант; - могут быть установлены пациентам любого возраста; - продолжительный срок истирания СВМПЭ	- неизбежный износ вкладыша из СВМПЭ; - продукты износа вызывают остеолит и расшатывание компонентов эндопротеза	10
Металл/СВМПЭ	- обладают низкой токсичностью; - используются чаще других; - доступная стоимость; - наклон угла чашки может достигать 90 градусов	- наименее износостойкие; - продукты износа СВМПЭ вызывают остеолит; - диаметр головки не более 32 мм	20

Электрохимические процессы, имеющие место в эндопротезированных суставах, связаны с установкой компонентов из разнородных металлов. После имплантации в электролитной среде организма они образуют гальваническую пару, в которой из-за разности потенциалов возникают токи обмена и происходит коррозия металла и разрушение окружающих тканей. Гальваническая коррозия характерна для модульных имплантатов в месте соединения ножки с металлической головкой эндопротеза. Вместе с трибокоррозией (разрушением поверхности материала при одновременном действии механических нагрузок и химических реакций со стороны агрессивной окружающей среды) и биокоррозией (действием белков, протеогликанов синовиальной жидкости, активных форм кислорода, выделяемых макрофагами) это ведет к ускорению асептического расшатывания эндопротеза [17]. Для снижения активности гальванических пар ведутся поиски покрытий для металлических компонентов эндопротезов или способов их химической обработки для создания защитного диэлектрического слоя.

Прочность фиксации компонентов эндопротезов у пациентов с нормальной и механически прочной костной тканью, как правило, достигается тугой пресс-фит посадкой. Для лучшего сцепления и врастания костной ткани на контактирующих с костью поверхностях имплантатов создают пористые металлические или шероховатые гидроксиапатитные покрытия. Однако в процессе остеоинтеграции в микропоры металла врастает не только костная, но и фиброзная ткань, металлические покрытия отслаиваются, пористые вставки ломаются и выпадают, а покрытие из гидроксиапатита со временем может растворяться.

У пациентов с остеопорозом выполняется цементная фиксация эндопротеза. Создание толщины слоя цемента от 1,2 до 3 мм является достаточным для надежной фиксации компонентов эндопротеза. Более тонкий или более толстый слой цемента легко разрушается под действием компрессионной нагрузки [18]. Добавление в цемент дозы антибиотика, превышающей 2 грамма, снижает некоторые механические свойства цемента [19]. Также скорейшему разрушению подвергается цемент с неоднородной и пористой структурой. В результате раскрашивания цемента образуются мелкие частицы, вызывающие гранулематозные изменения и резорбцию прилегающей костной ткани. Вместе с тем однородная структура, обеспечивающая механическую прочность цемента, может быть легко достигнута в ходе его приготовления – смешивания компонентов с помощью специальных центрифуг или путем вакуумного смешивания [18].

Влияние костного цемента на кость и организм человека обусловлено химическими свойствами и взаимодействием компонентов цемента – порошкообразного (полиметилметакрилат 83–88% по массе, в смеси с инициатором) и жидкого компонента (метилметакрилат 98–99% по массе). После смешивания компонентов начинается экзотермическая реакция полимериза-

ции и нагревание цемента. Температура нагрева цемента в организме человека достигает 82–86°C (вне организма 120–140°C). Более низкая температура полимеризации в организме обеспечивается относительно тонким слоем цемента и теплоотдачей за счет большой поверхности протеза и кровотока в окружающих тканях, однако значительно превышает температуру денатурации белков в организме человека (45–60°C) в результате чего повреждает граничащую кость и окружающие ткани. В дальнейшем в течение нескольких недель после операции погибшие от ожога клетки и ткани поглощаются макрофагами, в костный матрикс начинают врастать капилляры, микродефекты в кости заполняются волокнистой соединительной тканью.

Непосредственно во время операции может возникнуть общая реакция организма на введение цемента – синдром имплантации костного цемента. Частота этого осложнения колеблется по данным разных авторов от 0,06–0,1 до 28% [20, 21]. У взрослых с онкопатологией при цементном эндопротезировании синдром имплантации костного цемента разной степени тяжести отмечается в 26–74% случаев [22]. Этиопатогенез синдрома описывают эмболической моделью, когда в ходе операции для лучшего сцепления цемент вводят и продавливают в кость под высоким давлением, в дальнейшем при нагревании цемент расширяется, увеличивая давление, и выталкивает из кости в кровоток воздух, жир, костный мозг, частицы кости и цемента, агрегаты тромбоцитов и фибрина. Их попадание в кровеносное русло вызывает потенциально смертельные нарушения – гипоксемию, артериальную гипотензию, а при тяжелом течении потерю сознания, аритмию и остановку сердца [20, 23].

Для контроля за состоянием пациента и оптимизацией действий в случае реакции на имплантацию костного цемента во время операции должна осуществляться постоянная коммуникация между анестезиологами, хирургами и персоналом операционной. Неслучайно, что в результате обсуждения этапа цементирования в рамках контрольного списка Всемирной организации здравоохранения по безопасной хирургии в некоторых учреждениях за рубежом принят протокол «Цементный час», заключающийся в том, что все члены операционной бригады берут на себя определенные роли и сосредотачиваются на моменте установки эндопротеза: музыка включается, важные этапы процесса озвучиваются ведущим хирургом, включая начало и конец «цементного часа» [20, 24, 25].

Асептическая нестабильность эндопротеза (асептическое расшатывание) является одной из наиболее частых и не имеющей тенденции к снижению причин ревизионных вмешательств после первичного эндопротезирования и может быть ранней – в сроки до 5 лет (50,3%), поздней – в сроки свыше 5 лет (57% и более) и практически неизбежна через 10–15 лет после операции [26–30].

Причинами нестабильности, связанными с имплантатом и самой операцией, являются та-

кие, как неподходящая конструкция, размер и тип фиксации эндопротеза, присутствие в зоне контакта микроподвижности более 40 мкм, неадекватная ориентация имплантата, износ СВМ-ПЭ и остеолитиз, вызванный накоплением частиц полиэтилена в пространствах между костью и имплантатом [15, 30].

Ведущая причина, связанная с организмом пациента, – это плохое качество костной ткани, например, при возрастных изменениях скелета после 50 лет, когда резорбция преобладает над костеобразованием, а также при ревматологических заболеваниях. Не менее значимым предиктором расшатывания является превышение нормальной массы тела [31]. У таких пациентов ранняя нагрузка после операции на фоне стрессового ремоделирования кости в течение первых 12 недель усиливает микроподвижность и в 20,6% случаев ведет к проседанию ножки эндопротеза в среднем на 3,7 мм [30, 32, 33].

Обнаружить нестабильность эндопротеза зачастую и особенно в начале развития затруднительно. Просветление между костью и компонентом эндопротеза на рентгенограммах следует расценивать как нестабильность при его ширине более 2 мм, если оно окружает большую часть компонента и увеличивается со временем. При наличии клинических признаков асептической нестабильности эндопротеза тазобедренного сустава рентгенологические признаки нестабильности ацетабулярного компонента можно обнаружить в 37% случаев, бедренного компонента – в 87% случаев [30].

До появления рентгенологических признаков выявить расшатывание эндопротеза помогает остеосцинтиграфия [28]. Однако следует учитывать, что в области оперированного сустава в течение как минимум 6 месяцев фиксируется повышенное накопление радиофармпрепарата – до 100%, что принято расценивать как нормальное явление, а процент накопления 150 и выше свидетельствует об активном септическом воспалении [34].

Профилактика ранней асептической нестабильности заключается в индивидуальном подборе подходящего имплантата, длительной фармакологической коррекции интенсивности резорбции и костеобразования, и лечении системного остеопороза. Восстановление ранее утраченной костной ткани на границе с имплантатом продолжается в течение 12–15 месяцев после операции и в дальнейшем обеспечивает вторичную или «биологическую» фиксацию и стабильность эндопротеза [30, 35].

Аллергия на металлические имплантаты возникает примерно у 10% пациентов в виде реакций гиперчувствительности замедленного типа и проявляется локальной болью, отеком, дерматитом, нарушением заживления раны [17, 36].

Гиперчувствительность к металлам обуславливает 0,9–5,7% случаев асептического расшатывания эндопротезов [37]. Иммунную реакцию могут вызывать как сами металлы (никель, кобальт, хром, молибден, железо, титан), входящие в состав сплавов для эндопротезов суставов, так

и продукты их коррозии и соли металлов. Более часто реакции на имплантаты отмечаются после ревизионного эндопротезирования, у «сенситизированных» первичными эндопротезами пациентов.

В настоящее время до конца неясно, каким образом металлы эндопротезов провоцируют гиперчувствительность. С большой вероятностью это происходит подобно механизму, описанному для бериллия, ионы которого конъюгируют с HLA-пептидными комплексами и изменяют их конформацию. Измененные молекулы распознаются Т-лимфоцитами как чужеродные, активируют их рецепторы и запускают клеточную иммунную реакцию и хроническое аутоиммунное воспаление [38]. Аллергию на металлы также объясняет теория, согласно которой ионы и наночастицы металлов выступают в качестве гаптен-ов (неполных антигенов), которые объединяясь с молекулами белка образуют новый для организма человека антиген, взаимодействующий с рецепторами Т-лимфоцитов [39].

Снизить риск возникновения аллергической реакции на имплантат позволяет тщательно собранный перед операцией аллергологический анамнез и проведение патч-тестирования на металлы эндопротеза [36].

В случае выявления аллергии на металлы эндопротеза уже после операции производится его удаление. Также в ходе диагностических манипуляций, пункций и попыток санации до установления причины воспаления у этих пациентов возможно инфицирование изначально асептического очага, что дополнительно осложняет проблему и в свою очередь требует удаления эндопротеза.

Стресс-шилдинг (stress-shielding, синдром перераспределения нагрузки) – рентгенологически определяемый феномен адаптивной трансформации и ремоделирования кости в ответ на нагрузку, создаваемую, как правило, ножкой эндопротеза тазобедренного сустава [28]. Наиболее активно перестройка кости вокруг имплантата идет в первые 6–9 месяцев после операции и продолжается еще в течение 5–7 лет. В проксимальном отделе бедра (в 1-й и 7-й зонах Груэна) из-за снижения нагрузки на кость возникает уменьшение ее плотности (остеопения) и резорбция. Напротив, в местах с усиленной нагрузкой (в 3-й, 4-й и 5-й зонах Груэна) постепенно формируется утолщение и уплотнение костной ткани. Через 1 год в результате адаптивной перестройки в проксимальной части бедра потеря костной плотности достигает 17,2–24,9% [40, 41]. Перестройка кости вокруг ножки эндопротеза сопровождается болевым синдромом в средней трети бедра и увеличивает риск переломов [42]. Другим проявлением адаптивной перестройки является рост внешнего края большого вертела в направлении внешнего края вертлужной впадины, в результате чего в дальнейшем развивается ограничение движений в суставе [8].

Решение проблемы стресс-шилдинга лежит в области материаловедения и дальнейшего совершенствования

шенствования дизайна эндопротезов бесцементной фиксации и их покрытий для лучшего сцепления ножки с костной тканью, а в идеале – полного соответствия бедренного компонента проксимальному отделу бедра для обеспечения равномерной передачи нагрузки на кость [43, 44].

Заключение

Рассмотренные в статье проблемы, связанные с эндопротезами суставов и операциями эндопротезирования, являются актуальными для современной травматологии и ортопедии и требуют дальнейшего изучения и решения. Не-

прерывное совершенствование материалов и конструкций эндопротезов происходит с учетом выявляемых недостатков и направлено на снижение негативных явлений и увеличение срока службы имплантатов в организме человека. Глобальный научный и практический опыт наряду со знанием врачами-специалистами конструктивных особенностей современных эндопротезов, достоинств и недостатков применяемых пар трения, и оценкой качества костной ткани и состояния организма пациента позволяют в каждом конкретном случае подобрать и установить оптимальный для пациента имплантат.

Литература

1. National Joint Registry (NJR) annual report 2025 / National joint registry. – URL: <https://www.hqip.org.uk/resource/njr-2025/> (date of access: 04.04.2026).
2. Mallets, J. Exegesis to the Norwegian Orthopaedic Register / J. Mallets, T. Goswami // *Advances in General Practice of Medicine*. – 2025. – Vol. 6, № 1. – P. 134-149. – doi: 10.25082/AGPM.2024.01.004.
3. Arthroplasty registries at a glance: an initiative of the International Society of Arthroplasty Registries (ISAR) to facilitate access, understanding, and reporting of registry data from an international perspective / A. Lühbeke, L. A. Hoogervorst, P. J. Marang-van de Mheen [et al.] // *Acta Orthopaedica*. – 2025. – Vol. 96. – P. 116-126. – doi: 10.2340/17453674.2024.42706.
4. Эпидемиология первичного эндопротезирования тазобедренного сустава на основании данных регистра артропластики РНИИТО им. П. П. Вредена / И. И. Шубняков, Р. М. Тихилов, Н. С. Николаев [и др.] // *Травматология и ортопедия России*. – 2017. – Т. 23, № 2. – С. 81-101. – doi: 10.21823/2311-2905-2017-23-2-81-101.
5. Age at hip or knee joint replacement surgery predicts likelihood of revision surgery / C. Wainwright, J. C. Theis, N. Garneti, M. Melloh // *Journal of Bone and Joint Surgery. British volume*. – 2011. – Vol. 93-B, № 10. – P. 1411-1415. – doi: 10.1302/0301-620x.93b10.27100.
6. Implant survival and radiographic outcome of total hip replacement in patients less than 20 years old / M. Tsukanaka, V. Halvorsen, L. Nordsletten [et al.] // *Acta Orthopaedica*. – 2016. – Vol. 87, № 5. – P. 479-484. – doi: 10.1080/17453674.2016.1212180.
7. Имплантаты хирургические неактивные. Имплантаты для замены суставов : ГОСТ Р ИСО 21534-2013 : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 07 мая 2013 г. № 84-ст : дата введения 2014.11.01 / подготовлен ООО «ЦИТОпроект». – Москва : Стандартинформ, 2014. – 30 с. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/549/54923.pdf> (дата обращения: 30.06.2026).
8. Волков, Е. Е. Асептический некроз головки бедренной кости. Безоперационное лечение : монография / Е. Е. Волков, Х. Кэинь ; пер. с китайского В. Ф. Щичко. – Москва : Пиар-Пресс, 2010. – 110 с. – edn: QLYQNT.
9. Достоинства и недостатки современных пар трения эндопротезов тазобедренного сустава (обзор иностранной литературы) / И. И. Шубняков, Р. М. Тихилов, Гончаров М. Ю. [и др.] // *Травматология и ортопедия России*. – 2010. – № 3 (57). – С. 147-156. – doi: 10.21823/2311-2905-2010-0-3-147-156.
10. Твердые пары трения в эндопротезировании тазобедренного сустава. За и против / А. В. Скороглазов, А. Б. Бут-Гусаим, И. В. Сиротин, В. А. Мкртчян // *Российский медицинский журнал*. – 2014. – Т. 20, № 6. – С. 48-53. – doi: 10.17816/rmj38223.
11. Case report: Formation and recurrence of inflammatory pseudotumor after metal-on-metal hip arthroplasty / M. Min, C. Xing, P. Xu [et al.] // *Frontiers in Medicine*. – 2024. – Vol. 11. – Art. 1422230. – doi: 10.3389/fmed.2024.1422230.
12. Повышение уровня ионов металла в крови пациентов после эндопротезирования: клинические случаи / М. Томсен, В. Кренн, П. Томас, Ж. П. Крепер // *Травматология и ортопедия России*. – 2014. – № 4 (74). – С. 85-89. – doi: 10.21823/2311-2905-102.
13. Migration of polyethylene particles around nonloosened cemented femoral components from a total hip arthroplasty – an autopsy study / P. Massin, D. Chappard, B. Flautre, P. Hardouin // *Journal of Biomedical Materials Research*. – 2004. – Vol. 69, № 2. – P. 205-215. – doi: 10.1002/jbm.b.30001.
14. Патогенетические механизмы асептической нестабильности компонентов эндопротеза тазобедренного сустава после тотальной артропластики / А. И. Денисов, Д. А. Ешидоржиев, К. А. Гусев [и др.] // *Наука молодых (Eruditio Juvenum)*. – 2024. – Т. 12, № 3. – С. 455-467. – doi: 10.23888/HMJ2024123455-467.
15. Фигурска, М. Влияние частиц износа на поведение и биомеханические свойства поверхности кости-имплантат / М. Фигурска, В. Свишковский, Й. Й. Телера // *Российский журнал биомеханики*. – 2005. – Т. 9, № 2. – С. 19-33. – edn: JWSHRV.
16. Митрошин, А. Н. Материалы пары трения эндопротеза тазобедренного сустава (обзор) / А. Н. Митрошин, М. А. Ксенофонтов, Д. А. Космынин // *Саратовский научно-медицинский журнал*. – 2023. – Т. 19, № 4. – С. 345-350. – doi: 10.15275/ssmj1904345.
17. Eltit, F. Mechanisms of Adverse Local Tissue Reactions to Hip Implants / F. Eltit, Q. Wang, R. Wang // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. – 2019. – Vol. 7. – Art. 176. – doi: 10.3389/fbioe.2019.00176.
18. Абросимов, В. Г. Трибологические механизмы в развитии нестабильности эндопротеза тазобедренного сустава / В. Г. Абросимов, И. А. Щепеткин, И. И. Анисеня // *Гений ортопедии*. – 2002. – № 1. – С. 45-50.
19. Hines, C. B. Understanding Bone Cement Implantation Syndrome / C. B. Hines // *The Journal of the American Association of Nurse Anesthetists*. – 2018. – Vol. 86, № 6. – P. 433-441.
20. Синдром имплантации костного цемента как мультидисциплинарная проблема с позиции врача анестезиолога / М. А. Теренин, И. З. Ялонецкий, О. Т. Прасмыцкий, А. Д. Титова // *Военная медицина*.

- 2021. – № 4 (61). – С. 112-120. – doi: 10.51922/2074-5044.2021.4.112.
21. Гаряев, Р. В. Синдром имплантации костного цемента при эндопротезировании крупных суставов у онкологических больных / Р. В. Гаряев, А. В. Соколовский, И. А. Рычков // Саркомы костей, мягких тканей и опухоли кожи. – 2015. – № 1. – С. 8-16. – URL: https://docs.rucml.ru/repository/neicon/nc-sarcom/documents/40/433.ru_RU.pdf (дата обращения: 24.04.2026).
 22. Bone Cement Implantation Syndrome in Bone Tumor Surgeries: Incidence, Risk Factors, and Clinical Experience / T.-H. Yang, R.-S. Yang, C.-P. Lin, T.-H. Tseng // *Orthopaedic Surgery*. – 2021. – Vol. 13, № 1. – P. 109-115. – doi: 10.1111/os.12842.
 23. Bone cement implantation syndrome / A. J. Donaldson, H. E. Thomson, N. J. Harper, N. W. Kenny // *British Journal of Anaesthesia*. – 2009. – Vol. 102, № 1. – P. 12-22. – doi: 10.1093/bja/aen32.
 24. Griffiths, R. Safety guideline: reducing the risk from cemented hemiarthroplasty for hip fracture 2015 / R. Griffiths, S. M. White, I. K. Moppett [et al.] // *Anaesthesia*. – 2015. – Vol. 70, № 5. – P. 623-626. – doi: 10.1111/anae.13036.
 25. Hines, C. B. Bone Cement Implantation Syndrome: Key Concepts for Perioperative Nurses / C. B. Hines, A. Collins-Yoder // *Association of Operating Room Nurses journal*. – 2019. – Vol. 109, № 2. – P. 202-216. – doi: 10.1002/aorn.12584.
 26. Effect of bisphosphonates on periprosthetic bone mineral density after total joint arthroplasty: a meta-analysis / M. Bhandari, L. S. Bajammal, G. Guyatt [et al.] // *The Journal of Bone and Joint Surgery. American volume*. – 2005. – Vol. 87, № 2. – P. 293-301. – doi: 10.2106/JBJS.D.01772.
 27. Частота и структура негативных последствий эндопротезирования тазобедренного сустава в отдаленные сроки / Б. Г. Алиев, А. Исмаел, И. Л. Уразовская [и др.] // *Новости хирургии*. – 2022. – Т. 30, № 4. – С. 392-400. – doi: 10.18484/2305-0047.2022.4.392.
 28. Семантика и проблемы терминологии патологических состояний, ассоциированных с тотальным эндопротезированием тазобедренного сустава / А. Д. Синеев, Д. В. Чугаев, И. И. Шубняков [и др.] // *Гений ортопедии*. – 2019. – Т. 25, № 3. – С. 393-399. – doi: 10.18019/1028-4427-2019-25-3-393-399.
 29. Что изменилось в структуре ревизионного эндопротезирования тазобедренного сустава в последние годы? / И. И. Шубняков, Р. М. Тихилов, А. О. Денисов [и др.] // *Травматология и ортопедия России*. – 2019. – Т. 25, № 4. – С. 9-27. – doi: 10.21823/2311-2905-2019-25-4-9-27.
 30. Профилактика ранней асептической нестабильности эндопротезов крупных суставов (M16; M17; M80; M81; M85.9) : клинический протокол / ФГБУ «РНИИТО им. Р. Р. Вредена»; сост.: С. С. Родионов, А. Н. Торгашин. – Санкт-Петербург, 2013. – 19 с.
 31. Рыльков, М. И. Асептическая нестабильность при первичном эндопротезировании тазобедренного сустава / М. И. Рыльков, В. Г. Самодай, А. П. Федорищев // *Международный научно-исследовательский журнал*. – 2024. – № 7 (145). – Ст. 91. – doi: 10.60797/IRJ.2024.145.166.
 32. Proximal femoral bone loss and increased rate of fracture with a proximally hydroxyapatite-coated femoral component / R. Radl, C. Aigner, M. Hungerford [et al.] // *The Journal of Bone and Joint Surgery. British volume*. – 2000. – Vol. 82-B, № 8. – P. 1151-1155. – doi: 10.1302/0301-620X.82B8.0821151.
 33. Карякина, Е. В. Асептическая нестабильность эндопротеза тазобедренного сустава у больных коксартрозом / Е. В. Карякина, Е. А. Персова // *Саратовский научно-медицинский журнал*. – 2009. – Т. 5, № 3. – С. 375-378. – edn: KXPIPX.
 34. Ревизионное эндопротезирование коленного сустава (M10; M15; M17; M24.6; M25.2; M84.8; M87; M95.9; M96.6; T84; Z96.6; Z98.1; Q72.9) : клинические рекомендации / ФГБУ «РНИИТО им. Р. Р. Вредена»; сост.: Т. А. Куляба, Н. Н. Корнилов, Р. М. Тихилов [и др.]. – Санкт-Петербург, 2015. – 64 с.
 35. Комплексное клиничко-лучевое исследование больных с травматическими повреждениями тазобедренного сустава до и после эндопротезирования / Н. А. Карлова, М. Г. Бойцова, Я. П. Зорин, Е. В. Севрюкова // *Лучевая диагностика и терапия*. – 2018. – № 4 (9). – С. 81-88. – doi: 10.22328/2079-5343-2018-4-81-88.
 36. Осипова, В. В. Аллергия на металлические имплантаты: взгляд аллерголога / В. В. Осипова // *Астма и аллергия*. – 2015. – № 3. – С. 13-15. – edn: OOUDCB.
 37. Патогенетические факторы формирования асептической нестабильности эндопротезов суставов (обзор литературы) / О. М. Рожнова, В. М. Прохоренко, М. А. Садовой [и др.] // *Сибирский научный медицинский журнал*. – 2015. – Т. 35, № 5. – С. 84-89. – edn: UMBCJP.
 38. Structural basis of chronic beryllium disease: linking allergic hypersensitivity and autoimmunity / G. M. Clayton, Y. Wang, F. Crawford [et al.] // *Cell*. – 2014. – Vol. 158, № 1. – P. 132-142. – doi: 10.1016/j.cell.2014.04.048.
 39. Beryllium-induced hypersensitivity: genetic susceptibility and neoantigen generation / A. P. Fontenot, M. T. Falta, J. W. Kappler [et al.] // *The Journal of Immunology*. – 2016. – Vol. 196, № 1. – P. 22-27. – doi: 10.1094/jimmunol.1502011.
 40. Рентгеновские методы исследования в оценке состояния тазобедренного сустава у больных с дегенеративно-дистрофическими заболеваниями при лечении методом эндопротезирования / Н. А. Карлова, Е. В. Севрюкова, М. Г. Бойцова, Я. П. Зорин // *Лучевая диагностика и терапия*. – 2014. – № 3 (5). – С. 74-78. – doi: 10.22328/2079-5343-2014-3-74-78.
 41. Адаптивное ремоделирование костной ткани вокруг бедренных компонентов бесцементной фиксации Fitmore и Alloclassic / М. П. Карагодина, И. И. Шубняков, Р. М. Тихилов [и др.] // *Травматология и ортопедия России*. – 2015. – № 4 (78). – С. 15-28. – doi: 10.21823/2311-2905-2015-0-4-15-28.
 42. The relationship between stress shielding, bone density changes and implant migration, failure and fracture after total knee arthroplasty: A systematic review / G. Senesi, G. Barone, S. Pinelli [et al.] // *Journal of Experimental Orthopaedics*. – 2025. – Vol. 12, № 3. – P. e70350. – doi: 10.1002/jeo2.70350.
 43. Savio, D. When the Total Hip Replacement Fails: A Review on the Stress-Shielding Effect / D. Savio, A. Bagno // *Processes*. – 2022. – Vol. 10, № 3. – Art. 612. – doi: 10.3390/pr10030612.
 44. Бесцементные бедренные компоненты: история и современное состояние вопроса / И. И. Шубняков, А. Риахи, М. И. Шубняков [и др.] // *Травматология и ортопедия России*. – 2020. – Т. 26, № 2. – С. 160-179. – doi: 10.21823/2311-2905-2020-26-2-160-179.

References

1. National joint registry. National Joint Registry (NJR) annual report 2025 [Internet]. Available from: <https://www.hqip.org.uk/resource/njr-2025/>
2. Mallets J, Goswami T. Epexegesis to the Norwegian Orthopaedic Register. *Advances in General Practice*

- of Medicine. 2025;6(1):134-149. doi: 10.25082/AGPM.2024.01.004.
3. Lübbecke A, Hoogervorst LA, Marang-van de Mheen PJ, Prentice HA, Rolfson O, Nelissen RGHH, Steinbrück A, McGauran G, Barea C, Erikson K, Pedersen AB, Porter M; ISAR group. Arthroplasty registries at a glance: an initiative of the International Society of Arthroplasty Registries (ISAR) to facilitate access, understanding, and reporting of registry data from an international perspective. *Acta orthopaedica*. 2025;96:116-126. doi: 10.2340/17453674.2024.42706.
4. Shubnyakov II, Tikhilov RM, Nikolaev NS, Grigorieva LG, Ovsyankin AV, Cherny AZh, Drozdova PV, Denisov AO, Veber EV, Kuzmina IV. Epidemiology of Primary Hip Arthroplasty: Report from Register of Vreden Russian Research Institute of Traumatology and Orthopedics. *Traumatology and orthopedics of Russia*. 2017;23(2):81-101. doi: 10.21823/2311-2905-2017-23-2-81-101. (Russian).
5. Wainwright C, Theis JC, Garneti N, Melloh M. Age at hip or knee joint replacement surgery predicts likelihood of revision surgery. *Journal of Bone and Joint Surgery. British volume*. 2011;93-B(10):1411-1415. doi: 10.1302/0301-620x.93b10.27100.
6. Tsukanaka M, Halvorsen V, Nordsletten L, Engesæter IØ, Engesæter LB, Fenstad AM, Röhrli SM. Implant survival and radiographic outcome of total hip replacement in patients less than 20 years old. *Acta orthopaedica*. 2016;87(5):479-484. doi: 10.1080/17453674.2016.1212180.
7. GOST R ISO 21534-2013. Non-active surgical implants. Joint replacement implants. Particular requirements [Internet]. Moscow: Standartinform. 12 p. Available from: <https://files.stroyinf.ru/Data/549/54923.pdf> (Russian).
8. Volkov EE, Kjecin H. Asepticheskiy nekroz golovki bedrennoj kosti. Bezoperacionnoe lechenie. Shhichko VF, translator. Moscow: Piar-Press; 2010. 110 p. edn: QLYQNT. (Russian).
9. Shubnyakov II, Tikhilov RM, Goncharov MYu, Karpukhin AS, Mazurenko AV, Pliev DG, Bliznyukov VV. Merits and demerits of modern bearing surfaces of hip implants (revive of foreign literature). *Traumatology and orthopedics of Russia*. 2010;3(57):147-158. doi: 10.21823/2311-2905-2010-0-3-147-156. (Russian).
10. Skoroglyadov AV, But-Gusain AB, Sirotin IV, Mkrtychyan VA. The solid pairs of friction in endoprosthesis replacement of hip joint: pro and contra. *Russian medicine*. 2014;20(6):48-53. doi: 10.17816/rmj38223. (Russian).
11. Min M, Xing C, Xu P, Wei X, Fan L. Case report: Formation and recurrence of inflammatory pseudotumor after metal-on-metal hip arthroplasty. *Frontiers in Medicine*. 2024;11:1422230. doi: 10.3389/fmed.2024.1422230.
12. Thomsen M, Krenn V, Thomas P, Kretzer JP. Clinical cases of patients with arthroplasty and heightened blood Concentration of metal ions. *Traumatology and orthopedics of Russia*. 2014;4(74):85-89. doi: 10.21823/2311-2905-102. (Russian).
13. Massin P, Chappard D, Flautre B, Hardouin P. Migration of polyethylene particles around nonloosened cemented femoral components from a total hip arthroplasty – an autopsy study. *Journal of Biomedical Materials Research*. 2004;69(2):205-215. doi: 10.1002/jbm.b.30001.
14. Denisov AI, Eshdorzhiyev DA, Gusev KA, Dorzheyev VV, Miromanov AM. Pathogenetic Mechanisms of Aseptic Loosening of Hip Endoprosthesis Components after Total Arthroplasty. *Science of the young (Eruditio Juvenium)*. 2024;12(3):455-467. doi: 10.23888/HMJ2024123455-467. (Russian).
15. Figurska M, Świączkowski W, Telega JJ. Influence of wear debris on behavior and biomechanical properties of bone-implant interface. *Russian journal of biomechanics*. 2005;9(2):19-33. edn: JWSHRV. (Russian).
16. Mitroshin AN, Ksenofontov MA, Kosmynin DA. Materials for the friction pair of the hip joint endoprosthesis (review). *Saratov Journal of Medical Scientific Research*. 2023;19(4):345-350. doi: 10.15275/ssmj1904345. (Russian).
17. Eltit F, Wang Q, Wang R. Mechanisms of Adverse Local Tissue Reactions to Hip Implants. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2019;7:176. doi: 10.3389/fbioe.2019.00176.
18. Abrosimov VG, Shchepetkin IA, Anisenya II. Tribology mechanisms in the loosening process of the hip endoprosthesis. *Orthopaedic genius*. 2002;1:45-50. (Russian).
19. Hines CB. Understanding Bone Cement Implantation Syndrome. *The Journal of the American Association of Nurse Anesthetists*. 2018;86(6):433-441.
20. Terenin MA, Yalonetskii IZ, Prasmyskii OT, Titova AD. Bone cement implantation syndrome as a multidisciplinary problem from the position of an anesthesiologist. *Military medicine*. 2021;4(61):112-120. doi: 10.51922/2074-5044.2021.4.112. (Russian).
21. Garyaev RV, Sokolovsky AV, Rychkov IA. Bony cement implantation syndrome during joint replacement at oncological patients. Bone and soft tissue sarcomas, tumors of the skin [Internet]. 2015;(1):8-16. Available from: https://docs.rucml.ru/repository/neicon/nc-sarbone/documents/40/433.ru_RU.pdf (Russian).
22. Yang T-H, Yang R-S, Lin C-P, Tseng T-H. Bone Cement Implantation Syndrome in Bone Tumor Surgeries: Incidence, Risk Factors, and Clinical Experience. *Orthopaedic Surgery*. 2021;13(1):109-115. doi: 10.1111/os.12842.
23. Donaldson AJ, Thomson HE, Harper NJ, Kenny NW. Bone cement implantation syndrome. *British Journal of Anaesthesia*. 2009;102(1):12-22. doi: 10.1093/bja/aen32.
24. Griffiths R, White SM, Moppett IK, Parker, MJ, Chesser TJS, Costa ML, Johansen A, Wilson H, Timperley AJ. Safety guideline: reducing the risk from cemented hemiarthroplasty for hip fracture 2015. *Anaesthesia*. 2015;70(5):623-626. doi: 10.1111/anae.13036.
25. Hines CB, Collins-Yoder A. Bone Cement Implantation Syndrome: Key Concepts for Perioperative Nurses. *Association of Operating Room Nurses journal*. 2019;109(2):202-216. doi: 10.1002/aorn.12584.
26. Bhandari M, Bajammal LS, Guyatt G, Griffith L, Busse JW, Schünemann H, Einhorn TA. Effect of bisphosphonates on periprosthetic bone mineral density after total joint arthroplasty: a meta-analysis. *The Journal of Bone and Joint Surgery. American volume*. 2005;87(2):293-301. doi: 10.2106/JBJS.D.01772.
27. Aliev BG, Ismael A, Urazovskaya IL, Mansurov DS, Tkachenko AN, Khaydarov VM, Spichko AA. Frequency and structure of negative consequences of total hip arthroplasty in long terms. *Surgery news*. 2022;30(4):392-400. doi: 10.18484/2305-0047.2022.4.392. (Russian).
28. Sineokii AD, Chugaev DV, Shubnyakov II, Pliev DG, Gudzev AI, Karpukhin AS, Lasunskii SA. Semiotics and problems of terminology for pathological conditions associated with total hip arthroplasty. *Orthopaedic genius*. 2019;25(3):393-399. doi: 10.18019/1028-4427-2019-25-3-393-399. (Russian).
29. Shubnyakov II, Tikhilov RM, Denisov AO, Akhmedilov MA, Cherny AZh, Totoev ZA, Javadov AA, Karpukhin AS, Muravyeva YuV. What has changed in the structure of revision hip arthroplasty? *Traumatology and orthopedics of Russia*. 2019;25(4):9-27. doi: 10.21823/2311-2905-

- 2019-25-4-9-27. (Russian).
30. Rodionov SS, Torgashin AN, compilers; Russian Scientific Research Institute of Traumatology and Orthopedics named after RR Vredensian. Profilaktika rannej asepticheskoy nestabilnosti jendoprotezov krupnyh sustavov (M16; M17; M80; M81; M85.9). Klinicheskij protokol. Saint Petersburg; 2013. 19 p. (Russian).
 31. Rylkov MI, Samoday VG, Fedorishchev AP. Aseptic instability in primary hip endoprosthesis replacement. International research journal. 2024;7(145):91. doi: 10.60797/IRJ.2024.145.166. (Russian).
 32. Radl R, Aigner C, Hungerford M, Pascher A, Windhager R. Proximal femoral bone loss and increased rate of fracture with a proximally hydroxyapatite-coated femoral component. The Journal of bone and joint surgery. British volume. 2000;82-B(8):1151-1155. doi: 10.1302/0301-620X.82B8.0821151.
 33. Karjakina EV, Persova EA. Aseptic Instability of the Hip Endoprosthesis in Patients with Coxarthrosis. Saratov Journal of Medical Scientific Research. 2009;5(3):375-378. edn: KXPIPX. (Russian).
 34. Kuljaba TA, Kornilov NN, Tihilov RM, Selin AV, Kazemirskij AV, Kroitoru II, Petuhov AI, Saraev AV, Bovkis GJu, Kochergin PG, Fil AS, compilers; Russian Scientific Research Institute of Traumatology and Orthopedics named after RR Vredensian. Revizionnoe jendoprotezirovanie kolennogo sustava (M10; M15; M17; M24.6; M25.2; M84.8; M87; M95.9; M96.6; T84; Z96.6; Z98.1; Q72.9). Klinicheskie rekomendacii. Saint Petersburg; 2015. 64 p. (Russian).
 35. Karlova NA, Boitsova MG, Zorin YP, Sevryukova EV. Complex clinical and radiological examination of patients with hip joint traumatic lesions before and after endoprosthesis replacement. Diagnostic radiology and radiotherapy. 2018;4(9):81-88. doi: 10.22328/2079-5343-2018-4-81-88. (Russian).
 36. Osipova VV. Allergija na metallicheskie implantaty: vzgljad allergologa. Astma i allergija. 2015;(3):13-15. edn: OOUDCB. (Russian).
 37. Rozhnova OM, Prokhopenko VM, Sadovoy MA, Samokhin AG, Ageeva TA. Pathogenetic factors of aseptic loosening of joint implants (review). The Siberian scientific medical journal. 2015;35(5):84-89. edn: UMBCJP. (Russian).
 38. Clayton GM, Wang Y, Crawford F, Novikov A, Wimberly BT, Kieft JS, Falta MT, Bowerman NA, Marrack P, Fontenot AP, Dai S, Kappler JW. Structural basis of chronic beryllium disease: linking allergic hypersensitivity and autoimmunity. Cell. 2014;158(1):132-142. doi: 10.1016/j.cell.2014.04.048.
 39. Fontenot AP, Falta MT, Kappler JW, Dai S, McKee AS. Beryllium-induced hypersensitivity: genetic susceptibility and neoantigen generation. The Journal of Immunology. 2016;196(1):22-27. doi: 10.4049/jimmunol.1502011.
 40. Karlova NA, Sevryukova EV, Boitsova MG, Zorin YP. Methods of X-ray examination for evaluation of hip joints in patients with degenerative lesions, treated by endoprosthesis method. Diagnostic radiology and radiotherapy. 2014;3(5):74-78. doi: 10.22328/2079-5343-2014-3-74-78. (Russian).
 41. Karagodina MP, Shubnyakov II, Tikhilov RM, Pliev DG, Denisov AO. Adaptive bone remodeling around cementless femoral stems with two different designs: Fitmore and Allocated. Traumatology and orthopedics of Russia. 2015;(4(78)):15-28. doi: 10.21823/2311-2905-2015-0-4-15-28. (Russian).
 42. Senesi G, Barone G, Pinelli S, Scoppolini Massini M, Zinno R, Alesi D, Pinelli E, Bragonzoni L. The relationship between stress shielding, bone density changes and implant migration, failure and fracture after total knee arthroplasty: A systematic review. Journal of Experimental Orthopaedics. 2025;12(3):e70350. doi: 10.1002/jeo2.70350.
 43. Savio D, Bagno A. When the Total Hip Replacement Fails: A Review on the Stress-Shielding Effect. Processes. 2022;10(3):612. doi: 10.3390/pr10030612.
 44. Shubnyakov II, Riahi A, Shubnyakov MI, Denisov AO, Khujanazarov IE, Tikhilov RM. Cementless Hip Implants: History and Current Status of the Issue. Traumatology and orthopedics of Russia. 2020;26(2):160-179. doi: 10.21823/2311-2905-2020-26-2-160-179. (Russian).

BIOCOMPATIBILITY AND SURVIVORSHIP ISSUES OF JOINT ENDOPROSTHESES IN THE HUMAN BODY: AN ORTHOPEDIC SURGEON'S PERSPECTIVE

Yu. M. Cherniakova¹, A. V. Zenchenko^{1,2}, S. A. Kostov²

¹Gomel State Medical University, Gomel, Belarus

²Gomel Regional Clinical Hospital, Gomel, Belarus

Advancement of materials and designs for joint endoprosthesis have led to improved implant survival in the human body. However, issues such as wear of bearing surfaces, aseptic loosening of implants, insufficient biocompatibility of materials, and lack of osteointegration of endoprosthesis components remain relevant and require solutions.

Keywords: arthroplasty, joint endoprosthesis, wear of endoprosthesis, aseptic loosening

For citation: Cherniakova YuM, Zenchenko AV, Kostov SA. Problems of biocompatibility and survival of joint endoprosthesis in a human body: an orthopedic surgeon's view. Journal of the Grodno State Medical University. 2026;24(4): 398-405. <https://doi.org/10.25298/2221-8785-2026-24-4-398-405>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Об авторах / About the authors

*Чернякова Юлия Михайловна / Cherniakova Yuliya, e-mail: ychernyakova72@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7691-1781

Зенченко Александр Викторович / Zenchenko Aleksandr, ORCID: 0000-0002-7008-1833

Костов Сергей Анатольевич / Kostov Sergey, ORCID: 0009-0006-0719-3687

* – автор, ответственный за переписку / corresponding author

Поступила / Received: 07.05.2026

Принята к публикации / Accepted for publication: 26.06.2026