

СПОСОБЫ САНАЦИИ ГНОЙНОГО ОЧАГА И ЗАМЕЩЕНИЯ КОСТНОГО ДЕФЕКТА ПРИ ХРОНИЧЕСКОМ ОСТЕОМИЕЛИТЕ

METHODS OF PURULENT FOCUS SANITATION AND BONE DEFECT REPLACEMENT IN CHRONIC OSTEOMYELITIS

Остроушко И.П. Оstroushko I.P.
Глухов А.А. Glukhov A.A.
Лаптиёва А.Ю. Laptiyova A.Yu.
Тихонова П.А. Tikhonova P.A.
Смелянская Т.С. Smelyanskaya T.S.
Остроушко А.П. Ostroushko A.P.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный медицинский университет имени Н.Н. Бурденко» Минздрава России,
БУЗ ВО «Воронежская областная клиническая больница № 1»,
г. Воронеж, Россия

Voronezh State Medical University named after N.N. Burdenko,
Voronezh Regional Clinical Hospital No. 1,
Voronezh, Russia

По данным за 2025 г., в развитых странах заболеваемость остеомиелитом составляет 12–15 случаев на 100 000 населения, в развивающихся странах — 25–30 случаев на 100 000 населения. Хронический остеомиелит часто приводит к длительной утрате трудоспособности и высокому риску инвалидизации пациентов. Таким образом, это заболевание является сложной медицинской проблемой, требующей разработки эффективных методов санации гнойного очага, применяемых в комплексном лечении, для снижения заболеваемости, инвалидизации, летальности и экономических затрат.

Цель — изучить основные способы санации гнойного очага при хроническом остеомиелите, оценить эффективность их применения в клинической практике.

Материалы и методы. Выполнен обзор литературы из баз данных PubMed, Cochrane Library, ScienceDirect, eLIBRARY, глубина поиска — с 2015 по 2025 г.

Результаты. Наиболее перспективными являются комбинированные методы, включающие радикальное хирургическое удаление очага инфекции, адекватную санацию, использование антимикробных препаратов и заполнение костных дефектов биосовместимыми материалами. Внедрение методик программной санации и использование материалов с контролируемым высвобождением антибиотиков позволяют не только снизить риск рецидивов, но и минимизировать побочные эффекты системной антибактериальной терапии.

Заключение. Оптимальная стратегия санации гнойного очага при хроническом остеомиелите должна включать: комплексный подход, сочетающий хирургическую санацию, дренирование, местное применение антисептиков и антибактериальных препаратов; использование биоразлагаемых костно-пластических материалов, обеспечивающих длительное антибактериальное действие и способствующих регенерации костной ткани; применение современных систем доставки лекарственных препаратов, таких как наноструктуры и липосомальные комплексы, что позволяет минимизировать системные осложнения и повысить эффективность терапии.

According to data for 2025, the incidence of osteomyelitis in developed countries is 12-15 cases per 100,000 population, in developing countries — 25-30 cases per 100,000 population. Chronic osteomyelitis often leads to long-term disability and a high risk of disability for patients. Thus, chronic osteomyelitis is a complex medical problem that requires the development of effective methods of purulent focus sanitation used in complex treatment to reduce morbidity, disability, mortality and economic costs.

Objective — to study the main methods of purulent focus sanitation in chronic osteomyelitis, to evaluate the effectiveness of their use in clinical practice.

Materials and methods. A review of the literature from the PubMed, Cochrane Library, ScienceDirect, and eLibrary databases has been performed, limited to the time interval from 2015 to 2025.

Results. The most promising are combined methods, including radical surgical removal of the infection site, adequate sanitation, the use of antimicrobial drugs and filling bone defects with biocompatible materials. The introduction of programmatic sanitation techniques and the use of controlled-release antibiotic materials can not only reduce the risk of relapses, but also minimize the side effects of systemic antibacterial therapy.

Conclusion. The optimal strategy for debridement of a purulent focus in chronic osteomyelitis should include: a comprehensive approach combining surgical debridement, drainage, and local application of antiseptics and antibacterial agents; the use of biodegradable bone-grafting materials that provide long-lasting antibacterial action and promote bone tissue regeneration; and the use of modern drug delivery systems, such as nanostructures and liposomal complexes, which minimize systemic complications and improve the effectiveness of therapy.

Для цитирования: Остроушко И.П., Глухов А.А., Лаптиёва А.Ю., Тихонова П.А., Смелянская Т.С., Остроушко А.П. СПОСОБЫ САНАЦИИ ГНОЙНОГО ОЧАГА И ЗАМЕЩЕНИЯ КОСТНОГО ДЕФЕКТА ПРИ ХРОНИЧЕСКОМ ОСТЕОМИЕЛИТЕ //ПОЛИТРАВМА / POLYTRAUMA. 2025. № 4. С. 72-81.

Режим доступа: <http://poly-trauma.ru/index.php/pt/article/view/602>

DOI: 10.24412/1819-1495-2025-4-72-81

Ключевые слова: санация гнойного очага; костная пластика; хроническая инфекция; остеомиелит

Keywords: purulent focus sanitation; bone grafting; chronic infection; osteomyelitis

По данным за 2023–2024 гг., в развитых странах заболеваемость остеомиелитом составляет 12–15 случаев на 100 000 населения, в развивающихся странах — 25–30 случаев на 100 000 населения [1, 2]. С 2020 г. отмечается устойчивый рост заболеваемости остеомиелитом (около 5 %), что связывают с тенденцией к утяжелению повреждений, увеличением числа имплантаций в травматологии и ортопедии, ростом антибиотикорезистентных штаммов бактерий, коморбидностью пациентов [3].

В зависимости от тяжести перелома и наличия у пациентов сопутствующих заболеваний даже при плановых оперативных вмешательствах остеомиелит возникает в 1–5 % случаев при закрытых переломах и в 3–50 % случаев — при открытых [4].

Хронический остеомиелит часто приводит к длительной утрате трудоспособности и высокому риску инвалидизации пациентов, причем неблагоприятные результаты лечения, такие как рецидивы, ампутации, функциональная неполноценность конечностей, развиваются у каждого третьего пациента [5].

Лечение хронического остеомиелита сопряжено с существенными финансовыми затратами для системы здравоохранения [5]. При развитии заболевания затраты на лечение увеличиваются в несколько раз, это обусловлено длительной госпитализацией, необходимостью проведения многократных хирургических вмешательств, применения дорогостоящих антибиотиков и длительной реабилитации [5].

Несмотря на достижения в области диагностики и лечения, остеомиелит остается заболеванием с высоким риском летального исхода: так, у детей летальность снизилась с 45 до 8,4 %, однако число рецидивов и осложнений остается значительным, а у взрослых пациентов, особенно при наличии сопутствующих заболеваний, таких как сахарный диабет, риск летальности остается высоким [6, 7].

Таким образом, хронический остеомиелит является сложной медицинской проблемой, требующей разработки эффективных методов санации гнойного очага, применяемых в комплексном лечении, для снижения заболеваемости, инвалидизации, летальности и экономических затрат [8].

Цель исследования — изучить основные способы санации гнойного очага при хроническом остеомиелите, оценить эффективность их применения в клинической практике.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Выполнен обзор литературы из баз данных PubMed, Cochrane Library, ScienceDirect, eLIBRARY. Поиск проведен по ключевым словам «хронический остеомиелит», «санация гнойного очага», «секвестрэктомия», «вакуумная терапия», «фотодинамическая терапия», «озонотерапия», «костнопластические материалы», «биоактивное стекло», «ПММА», «инфекция кости», ограничен временным интервалом с 2015 по 2025 г. Критерии исключения из анализа: описание отдельных клинических случаев; книги и документы.

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ ДИАГНОСТИКИ И ЛЕЧЕНИЯ

Хронический остеомиелит — воспалительное деструктивное заболевание кости, вызываемое бактериями, микобактериями или грибами [9]. Заболевание характеризуется хроническим, рецидивирующим течением, что является следствием глубоких микроциркуляторных расстройств и нарушением процессов репарации костной ткани [1]. Эти патологические изменения кости могут возникать в условиях, оптимальных для распространения патогенной микрофлоры: при травмах, снижении иммунитета, местного и общего [10]. Хронический остеомиелит, согласно данным литературы, составляет 12–25 % от всех заболеваний опорно-двигательного аппарата, причем с частотой 21–46,2 % и 7,6–13,2 % он развивается после оперативных

вмешательств по поводу открытых и закрытых переломов соответственно [11].

Актуальность хронического остеомиелита как с медицинской, так и с социальной точки зрения обусловлена тем, что в структуре заболеваемости 80 % зарегистрированных случаев приходится на трудоспособных граждан [10].

Для установления глубины и протяженности поражения участка кости и наличия инфекции в костномозговом канале необходимо комплексное обследование пациентов перед операцией, включающее в себя бактериологическое исследование, обзорную рентгенографию, КТ, МРТ и лазерную доплеровскую флоуметрию [8], визуализацию свечения секвестров, меченых тетрациклином, в УФ-излучении [8], фиброскопии [8].

Тактика лечения должна учитывать не только результаты лабораторных и инструментальных исследований, но и наличие и течение сопутствующих патологий. При наличии факторов риска, согласно классификации остеомиелита Cierny-Mader, для снижения риска рецидива кость резецируют на расстоянии более 5 мм от краев раны [4]. Согласно исследованиям G. Cierny, перспективна стратегия лечения остеомиелита «carcinologic» resection, которая применяется в лечении опухолей костно-мышечной системы, подразумевающей удаление остеомиелитического очага en block, однако другие авторы считают эту методику чрезмерно калечащей и приводящей к инвалидизации пациентов, поэтому проблема определения границ нежизнеспособных тканей, объема ликвидации очага хронического остеомиелита в пределах здоровых тканей остается актуальной [4].

Существуют общие принципы лечения хронического рецидивирующего остеомиелита, при котором обычно поражается компактное, губчатое вещество, надкостница длинных трубчатых костей, включающие: своевременное вскрытие гнойных очагов и затеков, секвестрэктомию, некрэктомию,

санацию очага антисептиками, а также пластику образовавшихся костных дефектов в отдаленном периоде [10].

СПОСОБЫ САНАЦИИ ГНОЙНОГО ОЧАГА

Секвестрэктомия

Классическим вариантом лечения хронического остеомиелита является секвестрэктомия непосредственно через свищевой ход с последующим выскабливанием поверхностной полости специальной ложечкой и удалением секвестров мягких тканей [12]. Эффективность данного метода в самостоятельном варианте остается низкой, поэтому этот вид операций применяется как один из этапов радикальной операции с целью купирования воспаления и уменьшения размеров инфекционного очага [12].

Чаще осуществляют секвестрэктомию из широкого доступа, в ходе которой для продольной остеотомии и вскрытия гнойной полости вместо ложечек используют долота и фрезы. Полость очищают от некротических масс до «корытообразного» вида и многократно промывают раствором антибиотика [13]. Операция заканчивается дренированием образовавшейся полости и послойным ушиванием раны. В случае значительного костного дефекта применяются пластические операции на кости [14].

Для губчатых костей применяется другая тактика: вместо секвестрэктомии производят резекцию участка кости, что связано с особенностями анатомии и патогенеза: губчатая ткань имеет рыхлую структуру и высокую васкуляризацию, инфекция быстро распространяется диффузно, без четких границ некроза, секвестры чаще мелкие, множественные и неотделимые от окружающей ткани [15]. Простая санация в таких костях неэффективна, а радикальная резекция снижает риск рецидива и обеспечивает более полное удаление инфицированных участков [4].

При ограниченных окончатых резекциях, по мнению Г.Н. Акжигитова и Я.Б. Юдина, формируется недостаточный доступ к костномозговому каналу, тогда как продольная резекция по Пикину предпола-

гает удаление передней и боковой стенок пораженной кости, что заметно нарушает кровоснабжение и снижает прочность оставшегося участка костной ткани [4].

После интрамедуллярного остеосинтеза применяется радикальный метод обработки, включающий широкую переднюю декорткацию по типу «каное», с последующей пластикой дефекта кости мышечным лоскутом на микрососудистых анастомозах [4].

При диафизарной локализации инфекционного очага тактикой выбора считают интрамедуллярное рассверливание [16]. Помимо удаления некротизированных участков, создают условия для восстановления непрерывности костномозгового канала и сохранения нормальной функции кости [4]. Данный метод технически прост, но бывает трудновыполним при эпифизарных очагах поражения, также он неэффективен при распространении очага на метафиз или фестончастости эндоста, выявленной на рентгенограмме [16].

Дренирование

Неотъемлемой частью санирующей операции при хроническом остеомиелите является дренирование полости, которое, помимо активной аспирации через многоканальные дренажи, может включать в себя промывание растворами антисептиков [10].

Санация

В ходе операции санация достигается как за счет механического очищения костной полости и ран мягких тканей, так и за счет санации гнойной полости растворами антисептических средств (3% р-р перекиси водорода, 0,5% водный р-р хлоргексидина или 0,5–1% р-р диоксида) [17]. На рынке представлен препарат КоллапАн, изготовленный из полиметилметакрилата, нагруженного антибиотиком, обладающий значительными остеопротективными и антибактериальными свойствами. Полимерные шарики в течение длительного времени создают в очаге антибактериальную среду, ускоряя очищение раны и способствуя регенерации в послеоперационном периоде

[17]. В процессе растворения полимерных шариков, которое занимает от 20 до 50 суток, в очаг инфекции непрерывно и постепенно выделяется антибактериальный препарат [17]. Костная ткань формируется на месте повреждения, минуя стадию образования фиброзной прослойки [14]. Максимальным спектром противомикробной активности по отношению к микроорганизмам, выделенным из очагов некроза при хроническом остеомиелите, обладает диоксидин, в отношении грамположительной кокковой флоры наиболее эффективен линкомицин [18].

Максимальной концентрации антибактериальных средств можно достичь при регионарной перфузии растворов антибиотиков, а в послеоперационном периоде с целью уменьшения местных воспалительных явлений возможно также введение препаратов, улучшающих микроциркуляцию [17].

Программная ирригационно-аспирационная санация

Метод программной ирригационно-аспирационной санации (ПИАС) заключается в том, что после санации очага некроза при остеомиелите в костные полости устанавливают дренажи с перфоративными отверстиями и выводят их через контрапертуры в мягких тканях [19]. Дренажные трубки подключают к устройству АМП 01. Программные санации проводят с интервалом 3 часа, чередуя их с 1–2 часами «разрежения» в гнойной полости в режиме «аспирация» [19]. Параметры подачи антисептика и аспирации отработанного раствора по объему, скорости, времени устанавливаются с помощью блока управления. Данный метод рекомендован к использованию в первые 5–10 суток от начала лечения [19]. По мере стихания воспаления (с учетом данных бактериологического исследования) дренажи могут быть удалены. ПИАС, по данным клинических наблюдений сроком не менее 2 лет после проведенного лечения, положительно влияет на процессы заживления, сроки восстановления трудоспособности и отдаленные результаты лечения, снижает частоту рецидивов [19].

Фотодинамическая терапия

Фотодинамическая терапия (ФДТ) все чаще рассматривается как эффективный вспомогательный метод санации гнойного очага при хроническом остеомиелите [20]. Основной механизм действия ФДТ заключается во введении в зону воспаления фотосенсибилизирующего агента, который под воздействием света определенной длины волны активируется и образует активные формы кислорода (в том числе синглетный кислород) [20]. Эти радикалы обладают выраженной цитотоксичностью, вызывая разрушение мембран и ДНК микроорганизмов, включая устойчивые к антибиотикам штаммы, такие как MRSA (метициллин-резистентный *Staphylococcus aureus*) [21].

Особую актуальность метод приобретает при наличии сформировавшихся бактериальных биопленок, устойчивых к системной антибактериальной терапии и иммунному ответу организма [20]. ФДТ способна эффективно разрушать структуру биопленки, что делает патогены более восприимчивыми к антибиотикам и позволяет добиться глубокой санации инфицированной костной ткани [19].

В исследовании X. Yin и соавт. была разработана система локальной доставки фотосенсибилизатора LD4, направленная на лечение остеомиелита, вызванного MRSA у кроликов [20]. После курса ФДТ наблюдалось снижение бактериальной нагрузки более чем на 99,9 %, значительное уменьшение воспалительного инфильтрата и улучшение морфологической картины кости по данным микроскопии [21].

Другие клинические и лабораторные работы подтверждают высокую эффективность фотодинамического воздействия при гнойных инфекциях, в частности при использовании толудинового синего как фотосенсибилизатора достигалось значительное уменьшение количества жизнеспособных бактерий *S. aureus* как *in vitro*, так и в моделях *in vivo* [21].

Отмечается потенциал ФДТ в ускорении регенерации костной ткани: уничтожение патогенов уменьшает уровень хронического

воспаления, создавая условия для остеогенеза и ремоделирования кости [21]. Некоторые исследования рассматривают комбинацию ФДТ с антибиотикотерапией, хирургической санацией и применением костнозамещающих материалов для достижения комплексного эффекта [21].

ФДТ характеризуется минимальной системной токсичностью, отсутствием формирования устойчивости у микроорганизмов, возможностью локального применения и высокой избирательностью воздействия [21]. Однако ее эффективность зависит от типа используемого фотосенсибилизатора, глубины проникновения света, концентрации кислорода в тканях [22].

Таким образом, ФДТ может рассматриваться как высокоэффективный адъювантный метод при лечении хронического остеомиелита, особенно в случаях полирезистентной микрофлоры или рецидивирующих форм заболевания [21].

Вакуумная терапия

Вакуумная терапия представляет собой метод лечения, при котором на рану накладывается герметичная повязка, соединенная с вакуумным насосом, что позволяет удалять экссудат, снижать отек, улучшать микроциркуляцию и стимулировать образование грануляционной ткани [23].

Вакуумная терапия особенно эффективна при обширных ранах с наличием биопленок и глубоких гнойных полостей, обеспечивая активную санацию и подготовку тканей к последующей реконструкции [24].

Исследование 2019 г. продемонстрировало высокую эффективность лечения хронического остеомиелита большеберцовой кости с использованием NPWT, кожных лоскутов и костного цемента с антибиотиком: из 18 пациентов рецидив наблюдался лишь в одном случае, а средний уровень восстановления функции конечности составил 81,5 % от нормы [25].

Озонотерапия

Озонотерапия основана на использовании озонированной воды или газа для обработки инфици-

рованных тканей. Озон обладает мощными антимикробными и противовоспалительными свойствами, способствуя ускорению заживления [24].

Применение озонированной воды в сочетании с вакуумной терапией при лечении хронического остеомиелита показало значительное снижение бактериальной нагрузки и стимуляцию образования грануляционной ткани [24].

Озонотерапия может быть особенно полезна в случаях, когда традиционные методы лечения оказываются недостаточно эффективными, представляя альтернативный подход к санации гнойных очагов [24].

Обработка высокоэнергетическими инструментами

Обработка высокоэнергетическими инструментами, в том числе лазерная и ультразвуковая терапия, представляет собой перспективное направление в санации гнойных очагов при хроническом остеомиелите [26].

Лазерная терапия (LLLT) применяется как вспомогательный метод лечения хронического остеомиелита, особенно в челюстно-лицевой хирургии, стимулируя ангиогенез, улучшая микроциркуляцию и ускоряя регенерацию тканей [27].

Клиническое исследование, проведенное в Университете Белграда, показало, что у пациентов с хроническим остеомиелитом нижней челюсти, получавших LLLT после операции, через 3 и 6 месяцев наблюдалось значительное улучшение клинических показателей и снижение болевых ощущений по сравнению с контрольной группой [27].

Секвестрэктомия с пластикой костного дефекта

Все склеротически измененные участки эндоста резецируют изнутри через секвестральный костный дефект до кортикального слоя, в котором путем нанесения микроперфоративных отверстий формируют пористую структуру. Перфорации наносятся со стороны костной полости в пределах склеротически измененного участка до надкостницы, а затем заполняются

затвердевающим бактерицидным остеогенным костно-пластическим материалом (например, биокомпозиционным лиофилизированным аутоимплантом) [14, 10]. Пластика костного дефекта производится, когда в ране созревают грануляции, путем ввода остеогенного костно-пластического материала под рентген-контролем [10].

В результате операции отмечается снижение риска ишемии, восстановление непрерывности и опороспособности кортикального слоя на обработанном участке, создание оптимальных условий для остеогенеза и репарации в зоне интрамедуллярного костного дефекта [10].

СПОСОБЫ ЗАМЕЩЕНИЯ КОСТНОГО ДЕФЕКТА

В ЦИТО им Н. Н. Пирогова разработаны деминерализованные костные аллоимплантаты (ДКИ) с различной степенью деминерализации, которая достигается путем применения слабых растворов соляной кислоты, лиофилизации заготовок и радиационной стерилизации потоком быстрых электронов с поглощенной дозой 20–25 кГр [28]. В качестве донорских материалов могут быть использованы кости свода черепа, участки кортикального слоя длинных костей в виде пластин или стружки [28]. Имплантаты индуцируют рост кости, а также являются источником «строительного материала» в процессе регенерации. В течение 1,5–5 лет (срок зависит от обширности, локализации дефекта и т. п.) происходит органотипическая перестройка имплантатов [28].

Чтобы использовать губчатые кости в качестве аллоимплантата, их необходимо очистить от костномозгового компонента, сохранив архитектуру костной ткани. Этот метод позволяет использовать аллоимплантат в качестве носителя биологически активных компонентов, депо с обогащенной тромбоцитами плазмой, лекарственными препаратами [29]. Аллоимплантаты из губчатой кости удобны в случаях, когда необходимо замещение обширных костных дефектов [29]. Пропитанные антибиотиками костные трансплантаты обеспечивают поддержание постоянной концентра-

ции антибиотика в очаге в течение длительного периода времени с минимальным побочным эффектом [30].

В Европе применение насыщенного антибиотиками акрилцемент (ALAC) [31], полиметилметакрилата (ПММА), бусин и гранул сульфата кальция [32, 33] вытеснило системную антибиотикотерапию. Недостатком ALAC и ПММА является отсутствие способности к биодеградации, вследствие чего пациентам проводят повторную операцию по их удалению, иначе может развиваться вторичная инфекция вследствие наличия в организме инородного тела, что увеличивает стоимость и продолжительность госпитализации [34, 35]. При использовании ПММА реализуется только 10 % импрегнированного препарата, материал также гидрофобен и биоинертен, что диктует необходимость повторной операции для его удаления [34] и способствует удлинению продолжительности лечения [35]. На границе «кость-цемент» часто наблюдается материал-ассоциированная резорбция за счет формирования фиброзного слоя, препятствующая прямому контакту с имплантатом [36]. Спектр используемых препаратов сужается из-за высокой температуры полимеризации (до 120 °C).

ПММА — это тип синтетического полимера, который прост в использовании и обладает хорошей механической прочностью, для лечения остеомиелита [37]. После имплантации гранул ПММА с гентамицином эрадикация инфекции была достигнута у 80–100 % пациентов [37]. Однако он не поддается разложению и должен быть удален хирургическим путем при лечении остеомиелита. Другие разлагаемые синтетические полимеры, такие как ε -капролактон (PCL), молочная и гликолевая кислоты (PLGA), широко используются в качестве поддерживающих матриц для восстановления костей [38, 39].

Гидролиз разлагаемых полимеров, таких как PLGA, вызывает снижение локального pH, что может привести к реакции инородного тела и резорбции кости [39]. Смесь полимеров более предпочтительна: PCL является гидрофобным и мед-

ленно разлагается, в то время как PLGA — относительно гидрофильный и быстро разлагается при высокой способности к поглощению воды [40].

Более удобными для использования являются биодеградируемые депо-матрицы, например гидрогель [17]. Их имплантация не вызывает резорбцию кости, способствует своевременному заживлению послеоперационной раны, купируя воспаление, не вызывая токсических эффектов и прогрессирования хронического остеомиелита [17]. Микробная адгезия значительно снижается за счет гидрофильности и биоразлагаемости гидрогеля [17].

В качестве пластического материала используют биоактивное стекло, которое обладает антимикробными, остеокондуктивными и ангиогенными свойствами [41]. На его поверхности образуются слои гидроксипатита, которые тесно связываются с костной тканью, образуя острые игольчатые структуры [41]. Биоактивное стекло способствует высвобождению ионов, увеличению осмотического давления и pH, что приводит к повреждению бактериальных мембран [41].

Данный способ показал эффективность при лечении хронического остеомиелита в 90 % случаев независимо от выделенного патогена и состояния хозяина [42]. Однако сообщается, что при полимикробной инфекции инфицирование менее чем через 6 месяцев после операции было значительным [42].

Биоактивное стекло обладает хорошими эксплуатационными свойствами, поскольку гранулы мигрируют во время и после операции, однако оно медленно разлагается и остается в организме в течение нескольких лет [30].

Мезопористое биоактивное стекло имеет высокоупорядоченную структуру мезопорных каналов с размером пор менее 20 нм и большой площадью поверхности, обладает способностью доставки путем инкапсуляции фармацевтических терапевтических средств [43].

Применяют также заменители кости на основе кальция и фосфатов кальция с химической и кристаллической структурой, сходной с

неорганическим композитом кости, таким как сульфат кальция [44].

Эффект от их применения варьирует от 76,7 до 100 % [44]. Остеокондуктивный эффект ослабляется после быстрого гидролиза сульфата кальция, поскольку каркас, необходимый для восстановления кости, исчезает: через 6 месяцев после операции наблюдалось лишь частичное вращение кости в область дефекта [30]. В качестве осложнений применения материала авторы выделяют утечку материала из-за выдавливания из полости в процессе заживления, транзиторную гиперкальциемию [30].

При сочетании сульфата кальция с гиалуроновой кислотой биосовместимость повышается, снижаются воспалительные реакции, кроме того, гиалуроновая кислота компенсирует раннее рассасывание сульфата кальция и обеспечивает длительный каркас для восстановления кости [45].

N. Lindfors и соавт. сообщили о многоцентровом ретроспективном клиническом исследовании путем сравнения одноэтапной процедуры (группа биоактивного стекла) с двухэтапной процедурой (группа ПММА) в течение 15–95 месяцев: реинфекция чаще наблюдалась, когда для лечения использовали ПММА [42]. M. McNally и соавт. установили, что скорость искоренения инфекции при лечении сульфатом кальция была такой же, как и при лечении ПММА, однако формирование кости при обработке сульфатом кальция составило 100 %, тогда как при обработке ПММА этот показатель был 87,5 % [33].

При сравнении различных материалов эрадикация инфекции варьировала от 86 до 95 % при использовании биоактивного стекла, от 50 до 93,8 % — при использовании сульфата кальция [45].

В систематическом обзоре сообщалось, что коэффициент эрадикации инфекций при лечении хронического остеомиелита с использованием коллагеновых губок с гентамицином варьировал от 63 до 100 % [38]. Эффективность этих коллагеновых губок, насыщенных антибиотиками, в ортопедической хирургии ограничена из-за их ме-

ханических свойств, поэтому они чаще применяются у пациентов с инфекциями, связанными с мягкими тканями [30].

Композиты с лекарственной нагрузкой могут обеспечивать контролируемое высвобождение лекарственного средства, но способны оказывать отрицательное воздействие из-за начальной высокой концентрации и индукции устойчивости бактерий [30].

Структура полимера, включая площадь поверхности, объем пор и их число, влияет на скорость высвобождения лекарств [46]. Нанотрубки, липосомы и микросферы в качестве резервуарных систем могут обеспечить безопасный и эффективный перенос при включении лекарственного средства, проявляя эффективность в уничтожении внутриклеточных патогенов, борьбе с персистирующими инфекциями (такими как метициллинрезистентный золотистый стафилококк, MRSA) [47].

Поверхностные катионные методы, включающие иммобилизацию и удерживание лекарственных средств на поверхности материала через разлагаемые линкеры, могут предотвратить взрывное высвобождение и увеличить продолжительность высвобождения [30].

Были разработаны различные гибриды полимера и антибиотика, реагирующие на раздражители, которые способны избирательно высвобождать антибиотики в инфицированном участке, например, экзотоксин может взаимодействовать с бислоем липидной мембраны плазмы крови клетки-хозяина и разрушать его путем образования пор на поверхности клетки [48]. Используя эту способность к порообразованию, создали бактериальную чувствительную к токсинам липосомную композицию путем стабилизации наночастицами золота, адаптированными к хитозану, для высвобождения ванкомицина. В инфицированной области токсин, выделяемый *S. aureus*, образует поры на поверхности липосом, интенсивное высвобождение ванкомицина избирательно воздействует на возбудителя инфекции [49].

В неорганические заменители кости добавляют ионы металлов, та-

кие как Ag, Cu, Mg, Se и Sr, что придает им антимикробную способность. Эти ионы металлов повреждают бактерии в результате окислительного стресса, дисфункции белка или повреждения мембраны [49, 50].

Результаты анализа литературных данных представлены в таблице.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наиболее перспективными являются комбинированные методы лечения хронического остеомиелита, включающие радикальное хирургическое удаление очага инфекции, адекватную санацию, использование антимикробных препаратов и заполнение костных дефектов биосовместимыми материалами. Внедрение методик программной санации и использование материалов с контролируемым высвобождением антибиотиков позволяют не только снизить риск рецидивов, но и минимизировать побочные эффекты системной антибактериальной терапии.

Существенным ограничением традиционных методов остается высокая вероятность развития повторных инфекционных процессов, особенно при использовании неvascularizing материалов, таких как олиметилметакрилат (ПММА), требующих последующего удаления. В связи с этим предпочтение отдается биоразлагаемым материалам, обладающим антибактериальными и остеointegratивными свойствами.

Таким образом, оптимальная стратегия санации гнойного очага при хроническом остеомиелите должна включать:

- комплексный подход, сочетающий хирургическую санацию, дренирование, местное применение антисептиков и антибактериальных препаратов;
- использование биоразлагаемых костно-пластических материалов, обеспечивающих длительное антибактериальное действие и способствующих регенерации костной ткани;
- наноструктуры и липосомальные комплексы, являющиеся современными системами доставки лекарств, минимизирующими системные осложнения и повышающими

Таблица
Характеристика материалов для замещения костного дефекта
Table
Characteristics of materials for bone defect replacement

Материал Material	Состав Composition	Показания Indications	Противопоказания Contraindications	Необходимость повторной операции для извлечения материала The need for reoperation to extract the material
Биоактивное стекло Bioactive glass	Биоактивное стекло с антимикробными свойствами [41] Bioactive glass with antimicrobial properties [41]	Хронический остеомиелит со значительным остеонекрозом [30, 24] Chronic osteomyelitis with significant osteonecrosis [30, 24]	Индивидуальная непереносимость, риск воспалительной реакции, полимикробная инфекция [30, 42] Individual intolerance, risk of inflammatory reaction, polymicrobial infection [30, 42]	Да / Yes [43]
Заменители кости на основе кальция Calcium-based bone substitutes	Сульфат кальция, фосфат кальция [32, 33, 45] Calcium sulfate, calcium phosphate [32, 33, 45]	Дефекты костной ткани, хронический остеомиелит длинных трубчатых костей, губчатых костей, в стоматологической практике [45] Bone tissue defects, chronic osteomyelitis of long tubular bones, spongy bones, in dental practice [45]	Гиперкальциемия, риск утечки материала [30] Hypercalcemia, risk of material leakage [30]	Нет / No [45]
Полимеры (коллагеновая губка) Polymers (collagen sponge)	Коллагеновая губка с антибиотиком [30, 38] Collagen sponge with antibiotic [30, 38]	Местное лечение остеомиелита, профилактика повторного инфицирования [30,38] Local treatment of osteomyelitis, prevention of re-infection [30,38]	Механическая нестабильность костного дефекта [30] Mechanical instability of the bone defect [30]	Да / Yes [30]
Полимеры (полиметилметакрилаты, ПММА) Polymers (polymethyl methacrylates, PMMA)	Коллагеновая губка с ПММА [34, 36, 37, 42] Collagen sponge with PMMA [34, 36, 37, 42]	Местное лечение хронического остеомиелита, профилактика повторного инфицирования [34, 36] Local treatment of chronic osteomyelitis, prevention of re-infection [34, 36]	Механическая нестабильность костного дефекта [42] Mechanical instability of the bone defect [42]	Да / Yes [36, 37]
Композиты с лекарственной нагрузкой Drug-loaded composites	Наночастицы, липосомы, микросферы [30, 40, 46] Nanoparticles, liposomes, microspheres [30, 40, 46]	Контролируемое высвобождение антибиотиков [30] Controlled release of antibiotics [30]	Риск бактериальной устойчивости, местные воспалительные реакции [46] Risk of bacterial resistance, local inflammatory reactions [46]	Да / Yes [46]
Деминерализованные костные аллоимплантаты Demineralized bone allografts	Кости свода черепа, участки кортикального слоя длинных костей в виде пластин, стружки, чипсов. Имплантаты выполняют роль остеоиндукторов, источников «строительного материала» [28] The bones of the cranial vault, sections of the cortical layer of long bones in the form of plates, shavings, and chips. Implants act as osteoinductors, a source of "building material" [28]	Хронический остеомиелит длинных трубчатых костей [28] Chronic osteomyelitis of long tubular bones [28]	Тяжелое соматическое состояние пациента, онкологические, аутоиммунные заболевания в анамнезе [28] Severe somatic condition of the patient, history of oncological and autoimmune diseases [28]	Нет / No [28]

Леофилизат губчатых костей Lyophilisate of spongy bones	Губчатая кость без миелоидного компонента, факторы роста, плазма, обогащенная тромбоцитами, лекарственные средства [29] Cancellous bone without myeloid component, growth factors, platelet-rich plasma, drugs [29]	Значительные дефекты костной ткани [29] Significant bone tissue defects [29]	Тяжелое соматическое состояние пациента, онкологические, аутоиммунные заболевания в анамнезе [29] Severe somatic condition of the patient, history of oncological and autoimmune diseases [29]	Нет / No [29]
--	--	---	---	---------------

эффективность терапии. Однако необходимы дополнительные исследования, направленные на совершенствование методов регионарной антибактериальной терапии, разработку новых биосовместимых материалов и оптимизацию программной санации с учетом индивидуальных характеристик пациента.

Информация о финансировании и конфликте интересов

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

- Trushin PV, Razin MP. Chronic osteomyelitis of tubular bones: a modern view of the problem. *Vyatka Medical Bulletin*. 2023; (77):1;114-119. Russian (Трушин П. В., Разин М. П. Хронический остеомиелит трубчатых костей: современный взгляд на проблему // Вятский медицинский вестник. 2023. Т. 77, № 1. С. 114-119.)
- Chicherev EA, Tarakanov VA, Barova NK, Nadgeriev VM, Oganyan SA. Prevalence of osteomyelitis in children in the Krasnodar Territory. *Modern problems of science and education*. 2024; 3. DOI: <https://doi.org/10.17513/spno.33423>. Russian (Чичерев Е. А., Тараканов В. А., Барова Н. К., Надгериев В. М., Оганян С. А. Распространенность остеомиелитов у детей в Краснодарском крае // Современные проблемы науки и образования. 2024. № 3. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=33423> (дата обращения: 03.12.2025). DOI: <https://doi.org/10.17513/spno.33423>)
- Shipitsyna IV, Osipova EV, Astashova OA, Leonchuk DS. Monitoring of leading causative agents of osteomyelitis and their antibiotic resistance. *Clinical Laboratory Diagnostics*. 2020;6:9; 562-566. Russian (Шипицына И. В., Осипова Е. В., Асташова О. А., Леончук Д. С. Мониторинг ведущих возбудителей остеомиелита и их антибиотикорезистентности // Клиническая лабораторная диагностика. 2020. Т. 65, №9. С. 562-566.)
- Borisov IV. Surgical treatment for osteomyelitis of long bones. Wounds and wound infections. *Journal named after Professor B. M. Kostyuchenok*. 2023; 19(1):30-37. Russian (Борисов И. В. Хирургическая обработка при остеомиелите длинных костей // Раны и раневые инфекции. Журнал имени профессора Б. М. Костюченка. 2023. Т. 19, №1. С. 30-37.)
- Rimashevsky DV, Akhtyamov IF, Fedulichev PN, Zaalán W, Ustazov KA, Basith A et al. Pathogenetic features of the treatment of chronic osteomyelitis. *Genius of Orthopedics*. 2021; (27):5; 628-635. Russian (Римашевский Д. В., Ахтямов И. Ф., Федулчев П. Н., Заалан В., Устазов К. А., Басит А. и др. Патогенетические особенности лечения хронического остеомиелита // Гений ортопедии. 2021. Т. 27, № 5. С. 628-635.)
- Bazarov AYU, Sergeev KS, Faryon AO, Paskov RV, Lebedev IA. Hospital mortality in hematogenous osteomyelitis of the spine. *Spinal Surgery*. 2021; 18(3):86-93. Russian (Базаров А. Ю., Сергеев К. С., Фарйон А. О., Пасков Р. В., Лебедев И. А. Госпитальная летальность при гематогенном остеомиелите позвоночника // Хирургия позвоночника. 2021. Т. 18, №3. С.86-93.)
- Chen L, Li T, Jing W, Tang W, Tian W, Li C, et al. Risk factors of recurrence and life-threatening complications for patients hospitalized with chronic suppurative osteomyelitis of the jaw. *BMC Infect Dis*. 2013;13:313. DOI: 10.1186/1471-2334-13-313.
- Hassan M, Assi H, Hassan M, Bies JJ, Prakash S, Hassan A, et al. Chronic recurrent multifocal osteomyelitis: a comprehensive literature review. *Cureus*. 2023;15(8):e43118. DOI: 10.7759/cureus.43118.
- Wassif RK, Elkayal M, Shamma RN, Elkheshen SA. Recent advances in the local antibiotics delivery systems for management of osteomyelitis. *Drug Deliv*. 2021;28(1):2392-2414. DOI: 10.1080/10717544.2021.1998246.
- Prosvirin AA, Sklyanchuk ED, Guryev VV, Gorshenev VN, Teleshev AT, Akatov VS, et al. Development of a method for the treatment of post-traumatic osteomyelitis with justification for the use of synthetic materials with specified properties. *Technologies of living systems*. 2015; (12):4; 35-40. Russian (Просвирин А.А., Склянчук Е.Д., Гурьев В.В., Горшенев В.Н., Телешев А.Т., Акатов В.С., и др. Разработка способа лечения посттравматического остеомиелита с обоснованием применения синтетических материалов с заданными свойствами // Технологии живых систем. 2015. Т. 12, № 4. С. 35-40.)
- Batakov EA, Ishutov IV. Modern aspects of complex treatment of chronic osteomyelitis. *Kazan Medical Journal*. 2018; (89):1; 41-43. Russian (Батаков Е. А., Ишутов И. В. Современные аспекты комплексного лечения хронического остеомиелита // Казанский медицинский журнал. 2018. Т. 89, № 1. С. 41-43.)
- Garaev MR, Panteleev VS, Nartaylakov MA, Dorofeev VD, Inyushev DV, Golkov DS. Surgical treatment of chronic osteomyelitis. *Creative Surgery and Oncology*. 2019; (9):3; 209-215. Russian (Гараев М. Р., Пантелеев В. С., Нартайлаков М. А., Дорофеев В. Д., Инюшев Д. В., Голков Д. С. Хирургическое лечение хронического остеомиелита // Креативная хирургия и онкология. 2019. Т. 9, №3. С. 209-215.)
- Arshad Z, Lau EJ, Aslam A, Thahir A, Krkovic M. Management of chronic osteomyelitis of the femur and tibia: a scoping review. *EFORT Open Rev*. 2021;6(9):704-715. DOI: 10.1302/2058-5241.6.200136.
- Kochorov OT, Imankulova AS, Imankulov MA, Mamyshev AZH, Azimzhanova MN. Surgical treatment of patients with chronic hematogenous osteomyelitis of long bones with total damage. *Wounds and wound infections. Journal named after Professor B. M. Kostyuchenok*. 2023; (10):3; 40-45. Russian (Кочоров О. Т., Иманкулова А. С.,

- Иманкулов М. А., Мамышов А. Ж., Азимжанова М. Н. Хирургическое лечение больных хроническим гематогенным остеомиелитом длинных костей с тотальным поражением // Раны и раневые инфекции. Журнал имени профессора Б. М. Костюченко. 2023. Т.10, №3. С. 40-45.)
15. Kichenko A. A. Cancellous bone tissue remodelling: mathematical modeling. *Russian Journal of Biomechanics*. 2019; 23(3): 336-358. DOI 10.15593/RZhBiomeh/2019.3.02.
 16. Finelli CA, Dos Reis FB, Fernandes HA, Dell'Aquila A, Carvalho R, Miki N, et al. Intramedullary reaming modality for management of postoperative long bone infection: a prospective randomized controlled trial in 44 patients. *Patient Saf Surg*. 2019;13:39. DOI: 10.1186/s13037-019-0215-3.
 17. Tsiskarashvili AV, Melikova RE, Volkov AV, Zaitseva OS, Pkhakadze TYa, Artyukhov AA, et al. In vivo efficacy of polymer hydrogels impregnated with an antibacterial drug in chronic osteomyelitis. *Genius of Orthopedics*. 2023; (29):5; 535-545. Russian (Цискарашвили А. В., Меликова Р. Э., Волков А. В., Зайцева О. С., Пхакадзе Т. Я., Артюхов А. А., и др. In vivo эффективность полимерных гидрогелей, импрегнированных антибактериальным препаратом, при хроническом остеомиелите // Гений ортопедии. 2023. Т. 29, №. 5. С. 535-545.)
 18. Tsiskarashvili AV, Melikova RE, Phakadze TYa, Artyukhov AA, Sokolova NV. In vitro study of the antimicrobial activity of hydrogel-based matrices impregnated with antibiotics against leading microorganisms of orthopedic infection. *Genius of Orthopedics*. 2022; (28):6; 794-802. Russian (Цискарашвили А.В., Меликова Р.Э., Пхакадзе Т.Я., Артюхов А.А., Соколова Н.В. In vitro исследование антимикробной активности матриц на основе гидрогеля, импрегнированных антибиотиками, в отношении ведущих микроорганизмов ортопедической инфекции // Гений ортопедии. 2022. Т. 28, № 6. С. 794-802.)
 19. Xu Z, Gao Y, Meng S, Yang B, Pang L, Wang C, et al. Mechanism and in vivo evaluation: photodynamic antibacterial chemotherapy of lysine-Porphyrin conjugate. *Front. Microbiol*. 2016;7:242. DOI: 10.3389/fmicb.2016.00242.
 20. Yin X, Fang Z, Fang Y, Zhu L, Pang J, Liu T, et al. Antimicrobial photodynamic therapy involving a novel photosensitizer combined with an antibiotic in the treatment of rabbit tibial osteomyelitis caused by drug-resistant bacteria. *Front Microbiol*. 2022;13:876166. DOI: 10.3389/fmicb.2022.876166.
 21. Kwiatkowski S, Knap B, Przystupski D, Saczko J, Kędzierska E, Knap-Czop K, et al. Photodynamic therapy - mechanisms, photosensitizers and combinations. *Biomed Pharmacother*. 2018;106:1098-1107. DOI: 10.1016/j.biopha.2018.07.049.
 22. Chilakamarthi U, Giribabu L. Photodynamic therapy: past, present and future. *Chem. Rec*. 2017; 17:775-802.
 23. Fedyushkin VV, Baryshev AG. Vacuum therapy in the treatment of wounds of various etiologies: a systematic review. *Kuban Scientific Medical Bulletin*. 2021; (28):6; 117-132. Russian (Федюшкин В. В., Барышев А. Г. Вакуумная терапия в лечении ран различной этиологии: систематический обзор // Кубанский научный медицинский вестник. 2021. Т. 28, №6. С. 117-132.)
 24. Serov VN, Fedorova TA, Peretyagin SP, Boyarinov GA, Pyregov AV, Shmakov RG, et al. Methods of systemic use of ozone in medical practice. *Bioradicals and Antioxidants*. 2022; (9):1-2; 41-76. Russian (Серов В. Н., Федорова Т. А., Перетягин С. П., Бояринов Г. А., Пырегов А. В., Шмаков Р. Г. и др. Методы системного применения озона в медицинской практике // Биорадикалы и антиоксиданты. 2022. Т. 9, №1-2. С. 41-76.)
 25. Li J, Zhang H, Qi B, Pan Z. Outcomes of vacuum sealing drainage treatment combined with skin flap transplantation and antibiotic bone cement on chronic tibia osteomyelitis: a case series study. *Med Sci Monit*. 2019;25:5343-5349. DOI: 10.12659/MSM.915921.
 26. Zolotukhin VO. Application of laser technologies and collagen in the treatment of chronic osteomyelitis. *Scientific Review. Pedagogical sciences*. 2019; 5-3: 60-64. Russian (Золотухин В. О. Применение лазерных технологий и коллагена в купировании хронического остеомиелита // Научное обозрение. Педагогические науки. 2019. №. 5-3. С. 60-64.)
 27. Kekovic V, Schicho K, Perisanidis C, Mikovic N, Stanimirovic D, Soldatovic I, et al. Effect of low-level light therapy on post-operative healing of secondary chronic osteomyelitis of the jaws - a prospective study. *Ann Maxillofac Surg*. 2023;13(2):200-204. DOI: 10.4103/ams.ams_105_23.
 28. Chekanov AS, Voloshin VP, Lekishvili MV, Ochurenko AA, Martynenko DV. Remote results of the use of demineralized alloimplants based on donor cranial vault bones for replacing bone defects in revision hip arthroplasty. *Bulletin of Traumatology and Orthopedics named after N. N. Priorov*. 2015; 1:43-46. Russian (Чеканов А. С., Волошин В. П., Лекишвили М. В., Очуренко А. А., Мартыненко Д. В. Отдаленные результаты применения деминерализованных аллоимплантатов на основе донорских костей свода черепа для замещения костных дефектов при ревизионном эндопротезировании тазобедренного сустава // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. 2015. № 1. С. 43-46.)
 29. Lekishvili MV, Sklyanchuk ED, Akatov VS, Ochurenko AA, Guryev VV, Raginov IS, et al. Bone-plastic osteoinductive materials in traumatology and orthopedics. *Genius of Orthopedics*. 2015; 4:61-67. Russian (Лекишвили М. В., Склянчук Е. Д., Акатов В. С., Очуренко А. А., Гурьев В. В., Рагинов И. С., и др. Костнопластические остеоиндуктивные материалы в травматологии и ортопедии // Гений ортопедии. 2015. №4. С.61-67.)
 30. Jiang C, Zhu G, Liu Q Current application and future perspectives of antimicrobial degradable bone substitutes for chronic osteomyelitis. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2024; 12:1375266.
 31. Alonso LM, Torres IF, Tamayo ÁMZ, Lozano OEL, Ramos ID, García-Menocal JÁD, et al. Antibacterial effect of acrylic bone cements loaded with drugs of different action's mechanism. *J. Infect. Dev. Ctries*. 2019;13 (06): 487-495.
 32. Badie AA, Arafa MSJO. One-stage surgery for adult chronic osteomyelitis: concomitant use of antibiotic-loaded calcium sulphate and bone marrow aspirate. *Int. Orthop*. 2019; 43 (5): 1061-1070.
 33. Qin CH, Zhang HA, Chee YH, Pitarini A, Ali AA. Comparison of the use of antibiotic-loaded calcium sulphate and wound irrigation-suction in the treatment of lower limb chronic osteomyelitis. *Injury*. 2019; 50 (2): 508-514.
 34. Elhessy AH, Rivera JC, Shu HT, Andrews TJ, Herzenberg JE, Conway JD. Intramedullary canal injection of vancomycin- and tobramycin-loaded calcium sulfate: a novel technique for the treatment of chronic intramedullary osteomyelitis. *Strategies trauma limb reconstr*. 2022;17(2):123-130. DOI: 10.5005/jp-journals-10080-1554.
 35. Afanasyev AV, Bozhkova SA, Artyukh VA, Labutin DV, Liventsov VN, Kochish AA. Use of synthetic bone substitutes in one-stage treatment of patients with chronic osteomyelitis. *Genius of Orthopedics*. 2021; 27:232-236. Russian (Афанасьев А. В., Божкова С. А., Артюх В. А., Лабутин Д. В., Ливенцов В. Н., Кочиш А. А. Применение синтетических заменителей костной ткани при одноэтапном лечении пациентов с хроническим остеомиелитом // Гений ортопедии. 2021. Т. 27, № 2. С. 232-236.)

36. Sa Y, Yang F, Wang Y, Wolke JGC, Jansen JA. Modifications of Poly(Methyl Methacrylate) cement for application in orthopedic surgery. *Adv Exp Med Biol.* 2018;1078:119-134. DOI: 10.1007/978-981-13-0950-2_7.
37. van Vugt TAG, Walraven JMB, Geurts JAP, Arts JJC. Antibiotic-loaded collagen sponges in clinical treatment of chronic osteomyelitis: a systematic review. *J Bone Joint Surg Am.* 2018;100(24):2153-2161. DOI: 10.2106/JBJS.17.01140.
38. Wei S, Jian C, Xu F, Bao T, Lan S, Wu G, et al. Vancomycin-impregnated electrospun polycaprolactone (PCL) membrane for the treatment of infected bone defects: an animal study. *J. biomaterials Appl.* 2018; 32 (9): 1187–1196. DOI: 10.1177/0885328218754462.
39. Qian Y, Zhou X, Zhang F, Diekwisch TG, Luan X, Yang J. Triple PLGA/PCL scaffold modification including silver impregnation, collagen coating, and electrospinning significantly improve biocompatibility, antimicrobial, and osteogenic properties for orofacial tissue regeneration. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2019; 11 (41): 37381–37396.
40. Gubochkina AA, Legonkova OA. Bioresorbable bone materials: status in the Russian Federation. *Microelements in Medicine.* 2023;(24):4:3-18. Russian (Губочкина А. А., Легонькова О. А. // Биорезорбируемые костные материалы: состояние в Российской Федерации // Микроэлементы в медицине. 2023. Т. 24, № 4. С. 3-18.)
41. Essa D, Kondiah PPD, Choonara YE, Pillay V. The design of poly(lactide-co-glycolide) nanocarriers for medical applications. *Front Bioeng Biotechnol.* 2020;8:48. DOI: 10.3389/fbioe.2020.00048.
42. Lindfors N, Geurts J, Drago L, Arts JJ, Juutilainen V, Hyvönen P, et al. Antibacterial bioactive glass, S53P4, for chronic bone infections - a multinational study. *Adv Exp Med Biol.* 2017;971:81-92. DOI: 10.1007/5584_2016_156.
43. Anand A, Das P, Nandi SK, Kundu B. Development of antibiotic loaded mesoporous bioactive glass and its drug release kinetics. *Ceram. Int.* 2020; 46: 5477–5483. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.10.264.
44. Qin CH, Zhou CH, Ren Y, Cheng GY, Zhang HA, Fang J, et al. Extensive eggshell-like debridement technique plus antibiotic-loaded calcium sulphate for one-stage treatment of chronic calcaneal osteomyelitis. *Foot Ankle Surg.* 2020;26 (6): 644–649.
45. Habraken W, Habibovic P, Epple M, Bohner M. Calcium phosphates in biomedical applications: materials for the future? *Materials today.* 2016; 19(2): 69-87. DOI:10.1016/j.mattod.2015.10.008.
46. Chen Y, He X, Chen Q, He Y, Chen F, Yang C, et al. Nanomaterials against intracellular bacterial infection: from drug delivery to intrinsic biofunction. *Front Bioeng Biotechnol.* 2023;11:1197974. DOI: 10.3389/fbioe.2023.1197974.
47. Galiullina LF. Principles and systems of targeted drug delivery: a tutorial. Kazan, 2021. 172 p. Russian (Галиуллина Л. Ф. Принципы и системы адресной доставки лекарственных средств: учебное пособие. Казань, 2021. 172 с.)
48. Dey R, Mukherjee S, Barman S, Haldar J. Macromolecular nanotherapeutics and antibiotic adjuvants to tackle bacterial and fungal infections. *Macromol. Biosci.* 2021;21 (11): e2100182.
49. Martínez-Sanmiguel JJ, G Zarate-Triviño D, Hernandez-Delgadillo R, Giraldo-Betancur AL, Pineda-Aguilar N, Galindo-Rodríguez SA, et al. Anti-inflammatory and antimicrobial activity of bioactive hydroxyapatite/silver nanocomposites. *J. biomaterials Appl.* 2019; 33 (10): 1314–1326.
50. Tovani CB, Gloter A, Azais T, Selmane M, Ramos AP, Nassif N. Formation of stable strontium-rich amorphous calcium phosphate: possible effects on bone mineral. *Acta biomater.* 2019;92:315–324.

Сведения об авторах:

Остроушко И.П., врач-травматолог БУЗ ВО ВОКБ № 1, г. Воронеж, Россия.

Глухов А.А., д.м.н., профессор, заведующий кафедрой общей и амбулаторной хирургии, ФГБОУ ВО ВГМУ им. Н.Н. Бурденко Минздрава России, г. Воронеж, Россия. <http://orcid.org/0000-0001-9675-7611>

Лаптиёва А.Ю., к.м.н., доцент кафедры общей и амбулаторной хирургии ФГБОУ ВО ВГМУ им. Н.Н. Бурденко Минздрава России, г. Воронеж, Россия.

Тихонова П.А., студент 5-го курса лечебного факультета ФГБОУ ВО ВГМУ им. Н.Н. Бурденко Минздрава России, г. Воронеж, Россия.

Смелянская Т.С., студент 5-го курса лечебного факультета ФГБОУ ВО ВГМУ им. Н.Н. Бурденко Минздрава России, г. Воронеж, Россия. <https://orcid.org/0000-0002-6972-1979>

Остроушко А.П., к.м.н., доцент, доцент кафедры общей и амбулаторной хирургии ФГБОУ ВО ВГМУ им. Н.Н. Бурденко Минздрава России, г. Воронеж, Россия. <http://orcid.org/0000-0003-3656-5954>

Адрес для переписки:

Лаптиёва Анастасия Юрьевна, ул. Студенческая, д. 10, г. Воронеж, Россия, 394036

Тел: +7 (4732) 106-450

E-mail: laptievaa@mail.ru

Статья поступила в редакцию 27.08.2025

Рецензирование пройдено 10.10.2025

Подписано в печать 17.11.2025

Information about authors:

Ostroushko I.P., traumatologist, Voronezh Regional Clinical Hospital No. 1, Voronezh, Russia.

Glukhov A.A., MD, PhD, professor, chief of department of general and outpatient surgery, Voronezh State Medical University named after N.N. Burdenko, Voronezh, Russia.

Laptiyova A.Yu., associate professor of department of general and outpatient surgery, Voronezh State Medical University named after N.N. Burdenko, Voronezh, Russia.

Tikhonova P.A., student, Voronezh State Medical University named after N.N. Burdenko, Voronezh, Russia.

Smelyanskaya T.S., student, Voronezh State Medical University named after N.N. Burdenko, Voronezh, Russia. <https://orcid.org/0000-0002-6972-1979>

Ostroushko A.P., candidate of medical sciences, associate professor, associate professor of department of general and outpatient surgery, Voronezh State Medical University named after N.N. Burdenko, Voronezh, Russia. <http://orcid.org/0000-0003-3656-5954>

Address for correspondence:

Laptiyova Anastasia Yuryevna, Studencheskaya st., 10, Voronezh, Russia, 394036

Tel: +7 (4732) 106-450

E-mail: laptievaa@mail.ru

Received 27.08.2025

Review completed 10.10.2025

Passed for printing 17.11.2025