



Апробация эффективности нового типа спейсеров для локальной антибиотикотерапии

И.Ф. Ахтямов^{1,2,3✉}, О.А. Саченков¹, Р.А. Шафигулин^{1,2,3}, А.Э. Галяутдинова^{1,2}, Н.В. Харин¹, И.А. Беспалов³, С.В. Бойчук^{1,2}

¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

² Казанский государственный медицинский университет, Казань, Россия

³ Республиканская клиническая больница, Казань, Россия

Автор, ответственный за переписку: Ильдар Фуатович Ахтямов, yalta60@mail.ru

Аннотация

Введение. В настоящее время, кроме системной терапии, приняты два типа лечения гнойной инфекции костно-суставного аппарата: одно- или двухэтапное локальное воздействие на биопленку, причем оба предусматривают использование костного цемента с активным веществом, как правило, антибиотиком.

Цель работы — в условиях эксперимента оценить качественный и количественный выход из костного цемента антибиотика, внедренного в новый тип спейсера решетчатой структуры.

Материалы и методы. Использован новый тип имплантата (спейсера), имеющего решетчатую структуру, изготовленного с помощью аддитивных технологий, и образец сравнения, имитирующий традиционный армированный спейсер из костного цемента + антибиотик. Выход Ванкомицина измеряли методом спектрофотометрии на сроках до 30 дней. Для построения калибровочных кривых использовали регрессионную прямую по данным, полученным из маточных растворов.

Результаты. Получен эффективный профиль высвобождения антибиотика из костного цемента в первые дни эксперимента с последующим снижением к концу первой недели и выходом на равномерное плато. Количество зафиксированного антибиотика в растворах не превышало 1 % общей массы костного цемента и активного вещества. Из образцов, имеющих решетчатую структуру, количество выделенного антибиотика было выше, чем в образцах сравнения.

Обсуждение. Считается, что высвобождение антибиотика является поверхностным процессом и не зависит от общего объема костного цемента. Возможное увеличение объема лекарственного композиционного состава не приводит к пропорциональному увеличению количества высвобождаемого активного вещества. В данном исследовании это подтверждается тем, что даже при меньшем объеме материала в решетчатых структурах высвобождение антибиотика происходит более интенсивно по сравнению с контрольными образцами, что подчеркивает важность оптимизации геометрии и структуры материала для достижения максимальной эффективности высвобождения активных веществ.

Заключение. Решетчатая структура имплантатов количественно влияет на выделение антибиотика из костного цемента в окружающую среду.

Ключевые слова: инфекция костной ткани, костный цемент, имплантат, элюция антибиотика, аддитивные технологии

Для цитирования: Ахтямов И.Ф., Саченков О.А., Шафигулин Р.А., Галяутдинова А.Э., Харин Н.В., Беспалов И.А., Бойчук С.В. Апробация эффективности нового типа спейсеров для локальной антибиотикотерапии. *Гений ортопедии*. 2025;31(3):372-379. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-3-372-379.

Original article

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-3-372-379>

Testing the effectiveness of a new type of spacers for local antibiotic therapy

I.F. Akhtyamov^{1,2,3}✉, O.A. Sachenkov¹, R.A. Shafigulin^{1,2,3}, A.E. Galyautdinova^{1,2}, N.V. Kharin¹, I.A. Bespalov³, S.V. Boychuk^{1,2}

¹ Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russian Federation

² Kazan State Medical University, Kazan, Russian Federation

³ Republican Clinical Hospital, Kazan, Russian Federation

Corresponding author: Ildar F. Akhtyamov, yalta60@mail.ru

Abstract

Introduction The established treatments for purulent infection in the bone and joint involve one- or two-stage local effect on the biofilm with use of bone cement and an active substance including an antibiotic in addition to systemic therapy.

The **objective** was to evaluate experimental qualitative and quantitative antibiotic release from bone cement introduced into a new type of lattice-structured spacer.

Material and methods A new type of lattice-structured implant/spacer manufactured using additive technologies and a comparison sample simulating a traditional reinforced spacer made of bone cement + antibiotic were used. Vancomycin release was measured by spectrophotometry for periods of 30 days. A regression line was used to plot calibration curves based on data obtained from mother solutions.

Results An effective profile of antibiotic release from bone cement was obtained in the first days of the experiment, followed by a decrease at the end of the first week and an exit to a uniform plateau. The amount of fixed antibiotic in solutions did not exceed 1 % of the total mass of bone cement and active substance. The amount of antibiotic released from the lattice-structured samples was higher than that in the comparison samples.

Discussion Antibiotic release is a superficial process and is not dependent on the total volume of bone cement. A possible increase in the volume of the medicinal composition does not lead to a proportional increase in the amount of the active substance released. The findings showed that the antibiotic release is more intense even with a smaller volume of material in the lattice structures compared to the control samples, which emphasizes the importance of optimizing the geometry and structure of the material to achieve maximum efficiency of the release of active substances.

Conclusion The lattice structure of implants quantitatively affects the release of antibiotic from bone cement into the environment.

Keywords: bone infection, bone cement, implant, antibiotic elution, additive technologies

For citation: Akhtyamov IF, Sachenkov OA, Shafigulin RA, Galyautdinova AE, Kharin NV, Bespalov IA, Boychuk SV. Testing the effectiveness of a new type of spacers for local antibiotic therapy. *Genij Ortopedii*. 2025;31(3):372-379. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-3-372-379.

ВВЕДЕНИЕ

Гнойная инфекция является одним из наиболее грозных осложнений в хирургии костно-суставной системы [1–3]. Общепринятая системная терапия эффективно сопровождается локальным воздействием на патологический очаг [4–7]. В большинстве исследований методом купирования инфекционного осложнения является двухэтапное ревизионное хирургическое вмешательство: первичная установка спейсера из костного цемента (КЦ) с активным веществом (избранным антибиотиком) с последующей имплантацией ревизионной конструкции. Это касается как суставной патологии, так и патологии длинных костей [8].

Разработано немало технологий повышения сроков и количества выхода антибиотика в окружающую среду. Известным фактом является то, что элюция активного вещества происходит лишь из поверхностного слоя спейсера (в пределах 2–3 мм). Это предопределяет возможность повышения степени элюции увеличением площади соприкосновения лечебного композитного слоя (костный цемент + антибиотик) с окружающей средой [9]. Кроме того, влияние антибиотика (АБ) на окружающие ткани распространяется не более чем на 20–25 мм. Таким образом, технологически распределение лечебного композитного слоя (ЛКС) лишь по поверхности спейсера ограничено локацией инфекционного очага и затратно с точки зрения использования и перераспределения больших объемов АБ [10]. Нельзя забывать и о прочностных характеристиках формируемого спейсера, они должны обеспечить функциональные возможности пациента и служить при необходимости основой остеосинтеза [11, 12].

Использование решетчатых структур при изготовлении базовых имплантатов могло бы увеличить площадь соприкосновения композитного слоя с окружающей средой, улучшить элюцию АБ из КЦ. Предварительный расчет прочностных характеристик позволяет минимизировать изменения конструкции имплантата, заданные изготовителем. Сочетание объемной решетчатой конструкции с ЛКС формируют так называемый метаматериал, что могло бы стать одним из вариантов решения данной научно-практической проблемы [13]. Создание объемной решетчатой конструкции, как части имплантата (спейсера), осуществляется с использованием аддитивных технологий. Это достижимо в ходе проектирования элементарных ячеек, которые заполняют объем изделия. В тематических публикациях отмечено влияние распределения элементарной ячейки на прочность конструкции [14]. Иным методом является применение топологической или структурной оптимизации. N. Kladovasilakis et al. [15] оптимизировали конструкции для тазобедренных имплантатов, благодаря чему достигли 50 %-ной пористости с сохранением прочностных требований. Имплантаты на основе решетчатых структур могут выступать в роли преформированной базы с заранее заданными параметрами, что позволит снизить или вовсе исключить необходимость кустарного изготовления армированных спейсеров.

Цель работы — в условиях эксперимента оценить качественный и количественный выход из костного цемента антибиотика, внедренного в новый тип спейсера решетчатой структуры.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве базы для костного цемента с антибиотиком выбран цилиндр, имеющий решетчатую структуру (рис. 1, а), копирующий фрагмент предполагаемого имплантата под номером I и образец сравнения II (рис. 1, б), то есть фрагмент штифта, на поверхность которого сплошным слоем наносят мантию из КЦ толщиной 2 мм.

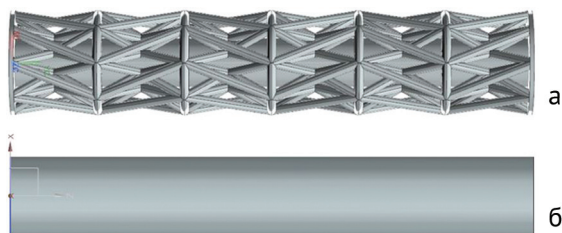


Рис. 1. Виды исследуемых образцов: а — образец решетчатого имплантата I; б — образец сравнения II

Образец I представляет собой компоновку внутреннего стержня диаметром 6 мм и слоя внешних ребер под углом в 45°, с внешним диаметром 12 мм. В качестве образца сравнения взят цилиндр с внешним диаметром 8 мм. Характеристики исследуемых образцов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительные параметры исследуемых образцов

№	Диаметр, мм	Длина, мм	Диаметр стержня, мм	Диаметр ребра, мм	Пористость, %	Объем цемента, мм ³	Площадь поверхности, мм ²
I	12	60	6	1	61,9	3702	2261
II	8	60	—	—	0	3769	2261

Исследуемые образцы

Для исследования выхода антибиотика из ЛКС методом лазерной стереолитографии с последующим дополнительным укреплением при помощи ультрафиолета изготовлено по четыре образца каждой структуры. Для производства образцов выбран фотополимерный принтер с фотополимерной смолой.

Исследование проведено на костном цементе Synucem (Франция). Для приготовления ЛКС каждого испытуемого образца использовано по 4,0 г сухого составляющего костного цемента и 0,2 г антибиотика Ванкомицин. Выбор АБ обусловлен термостабильностью, активным применением в клинической практике и научных исследованиях по данной проблеме. Порошковое составляющее КЦ смешивали с антибиотиком до однородного состояния, далее к смеси добавляли 2 мл мономера, замешивали до однородного пластичного состояния. Нанесение ЛКС на исследуемые образцы осуществляли при помощи одноразового шприца объемом 5 мл с внутренним диаметром 12 мм, который служил в качестве формы. На рис. 2 представлены исследуемые образцы.

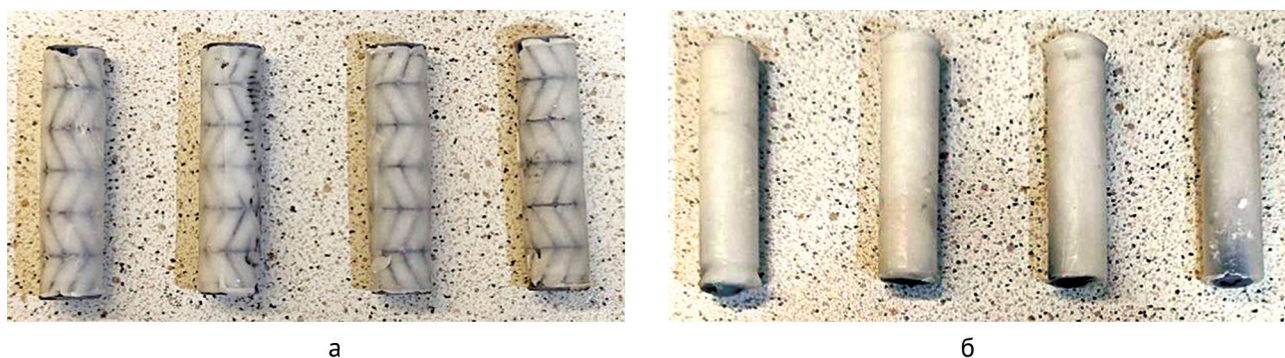


Рис. 2. Внешний вид изготовленных образцов (а — образцы I, б — образцы II)

Решетчатые структуры покрывали ЛКС так, чтобы он не выступал за торцы образца. Внешний диаметр образцов составил 12 мм. Каждый образец помещали в пробирку Falcon, заполненную 30 мл фосфатно-солевого буферного раствора Дульбекко (DPBS) без Ca^{2+} и Mg^{2+} при температуре 37 °С. Погружение образцов осуществляли для обеспечения полного контакта с DPBS.

Оценка выхода антибиотика из лекарственного композитного состава

Количественное определение антибиотика в растворах проводили с помощью спектрофотометрического метода на спектрофотометре BioMate 3S UV-Visible (США), позволяющего получить зависимости оптической плотности растворов от концентрации АБ. Измерения выполняли в диапазоне волн от 190 до 230 нм. В полученных спектрах оценивали пик измерений, соответствующий антибиотику. В качестве калибровочных эталонов использовали несколько маточных растворов АБ: Ванкомицин в концентрациях 0, 0,00005, 0,0001, 0,00025, 0,0005, 0,00075, 0,001, 0,002, 0,003, 0,004 мг/мл. Объем образца в кювете для проведения измерения был равен 1000 мкл. Ванкомицин в объеме 0,5 г растворялись в 5 мл DPBS для получения концентрации 1 мг/мл.

Таблица 2

Расчеты концентраций для построения калибровочных кривых Ванкомицина с помощью маточных растворов

Кол-во маточного раствора, мкл	Кол-во DPBS, мкл	Концентрация, мг/мл
400 из концентрации 0,01	600	0,004
300 из концентрации 0,01	700	0,003
200 из концентрации 0,01	800	0,002
500 из концентрации 0,01	4500	0,001
750 из концентрации 0,001	250	0,00075
500 из концентрации 0,001	500	0,0005
250 из концентрации 0,001	750	0,00025
200 из концентрации 0,001	1800	0,0001
500 из концентрации 0,0001	500	0,00005

Для построения калибровочных кривых использовали регрессионную прямую по данным, полученным из маточных растворов. Для оценки достоверности различий в высвобождении АБ между исследуемыми структурами применяли непараметрический критерий Манна – Уитни для сравнения двух независимых выборок и определения статистически значимых различий между ними.

Измерение кинетики элюции антибиотиков

Измерения элюции АБ осуществляли через 1, 3, 7, 15 и 29 дней соответственно. Определяли общее количество Ванкомицина в растворе в каждой точке измерения согласно расписанию. Для каждого дня концентрацию оценивали по следующей формуле:

$$C_a(d) = \frac{p(d)}{k} \cdot c(d),$$

где p — значение спектрометра во взятой пробе в заданный день, k — коэффициент регрессии, c — коэффициент, связанный с разбавлением пробы в кювете, d — длительность экспозиции в днях.

Стоит отметить, что коэффициент, связанный с разбавлением пробы в кювете, также зависел от дня измерения. Это связано с тем, что концентрация со временем возрастала. Для определения кинетики антибиотика использовали производную по времени, скорость высвобождения антибиотика определяли по формуле:

$$U(d_i) = \frac{C_a(d_i) - C_a(d_{i-1})}{d_i - d_{i-1}},$$

где d_i — длительность экспозиции i -ой съемки.

Вычисление массы выделенного антибиотика при заданной длительности экспозиции (d) осуществляли умножением соответствующей концентрации антибиотика в пробе на общий объем во флаконе V :

$$m_a(d) = C_a(d) \cdot V.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ пиков для спектров поглощения показал, что для Ванкомицина длина волны составляла 271–280 нм, что соответствует данным фармакопеи препарата.

Определен коэффициент регрессии и построена регрессионная кривая (0). Значение регрессионного коэффициента k для Ванкомицина — 405,9. Линейная зависимость для АБ показала высокий коэффициент детерминации $R^2 \geq 0,986$ (рис. 3). По показаниям концентрации в один день съемки вычисляли средние значения для обеих структур. Средние значения элюции для опытного образца I были выше, чем для образца сравнения II на всех этапах экспозиции (рис. 4). Оценивали попарную достоверность отличий средних величин.

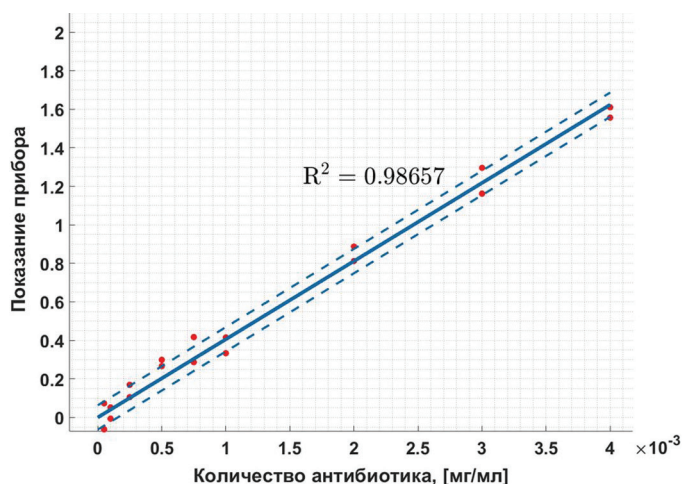


Рис. 3. Регрессионная кривая Ванкомицина: сплошная линия — регрессионная кривая, штрих-пунктирная линия — доверительный интервал, красные точки — значения спектрофотометра

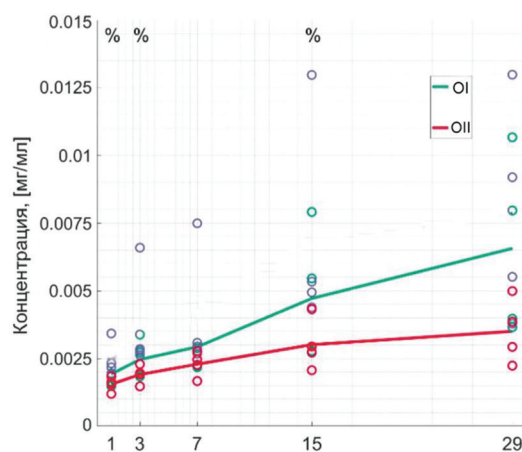


Рис. 4. Сравнительная кривая концентрации антибиотика

В средних значениях концентрации Ванкомицина значимой разницы по ходу исследования между образцами не выявлено. Контрольный образец II показывает наименьшую скорость высвобождения антибиотика, но и наименьший разброс (рис. 5). Отдельно рассчитана общая масса выделенного АБ Ванкомицина — 0,1969 мг в образце I и 0,1051 мг в образце II соответственно (рис. 6). Среднее значение высвобождения АБ в опытном образце II на 97 % лучше, чем в контрольном.

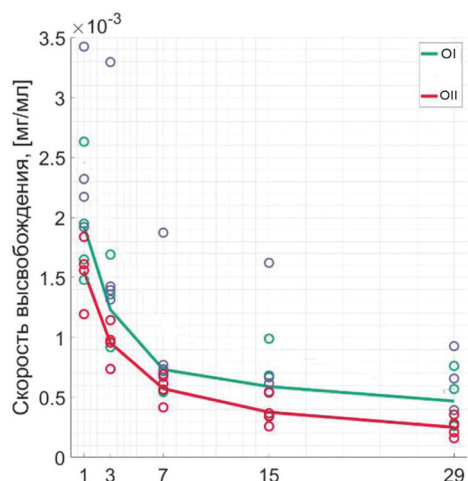


Рис. 5. Кинетика Ванкомицина

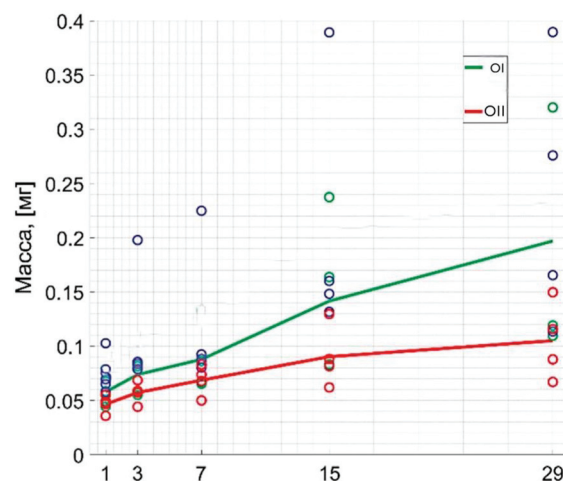


Рис. 6. Масса выделенного антибиотика

В результате многодневного эксперимента, получены изменения массы выделенного АБ в зависимости от сроков контроля (табл. 3).

Таблица 3

№	Выход антибиотика из ЛКС				
	Количество Ванкомицина, мкг				
	1	3	7	15	29
I	57,8 ± 15,2	73,8 ± 21,9	87,8 ± 31,6	141,5 ± 74,4	196,9 ± 101
II	46,5 ± 8,0	57,2 ± 10,0	68,6 ± 13,9	90,3 ± 28,4	105,1 ± 35,8

Для описания сравнительной характеристики образцов вводится коэффициент, — отношение свободной поверхности образца к объему заполняемого ЛКС. Данный параметр позволяет оценивать эффективность высвобождения АБ в зависимости от геометрических особенностей каждого образца. Кроме того, для количественной оценки процесса элюции рассчитано процентное отношение выделенного АБ к начально заложенному (табл. 4).

Таблица 4

В данном случае можно сказать, что введенный коэффициент, суть которого отношение свободной поверхности образца к объему КЦ, показывает зависимость от выделяемого количества АБ.

Относительные характеристики образцов

№	Площадь / Объем	Ванкомицин, %
I	0,61	0,07 ± 0,05
II	0,6	0,05 ± 0,0179

ОБСУЖДЕНИЕ

Данное исследование проведено с целью выявления влияния решетчатой структуры на элюцию антибиотика из лекарственного композитного слоя, то есть костного цемента, импрегнированного антибиотиком.

Во всех образцах получен характерный профиль элюции АБ из КЦ, а именно значимое высвобождение в первые дни эксперимента с последующим угасанием (седьмой день) и с выходом на равномерное плато (15-ый день), что соотносится с результатами аналогичных исследований [16–20]. Количество высвобождаемого АБ оказалось не более 1 % от массы импрегнированного препарата.

Отмечена существенная разница между исследуемыми образцами в количестве выделенного Ванкомицина. Так, в образцах, имеющих решетчатую структуру, количество выделенных АБ выше, несмотря на относительно большее изначальное содержание ЛКС в образцах сравнения.

Как известно, основная часть антибиотика элюируют с поверхностного слоя костного цемента из микропор и трещин [21–25], что подтверждается нашими результатами. Большой уровень выхода Ванкомицина, вероятно, объясняется наличием ребер решетчатых структур. Деление единой структуры ЛКС на мелкие участки повышает зону контакта с омывающим раствором и увеличивает диффузию АБ по сравнению с контрольным образцом. Это явление особенно важно при локальной антибиотикотерапии, где контролируемое и продолжительное высвобождение активных веществ является ключевым фактором эффективности [26].

Считается, что высвобождение антибиотика является поверхностным процессом и не зависит от общего объема КЦ [27, 28]. Возможное увеличение объема ЛКС не приводит к пропорциональному увеличению количества высвобождаемого АБ. В данном исследовании это подтверждается тем, что даже при меньшем объеме материала в решетчатых структурах высвобождение антибиотика более интенсивно по сравнению с контрольными образцами. Это подчеркивает важность оптимизации геометрии и структуры материала для достижения максимальной эффективности высвобождения активных веществ [29, 30].

Ограничения исследования заключаются в том, что исследован лишь один, хотя и наиболее востребованный, вид антибиотика. Требуется сравнительный анализ элюции комбинаций активных веществ из ЛКС, вариантов решетки, исследования на металлических образцах, то есть большой объем последующих экспериментов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование показало, что использование решётчатых структур для изготовления имплантатов-спейсеров позволяет увеличить скорость и количество элюированного АБ из ЛКС по сравнению с традиционным вариантом армирования костного цемента.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках выполнения гранта Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования Казанский государственный медицинский университет Минздрава России, при финансовой поддержке Государственной программы «Приоритет-2030».

Этическая экспертиза. Не применима.

Информированное согласие на публикацию. Не требуется.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Morcos MW, Kooner P, Marsh J, et al. The economic impact of periprosthetic infection in total knee arthroplasty. *Can J Surg*. 2021;64(2):E144-E148. doi: 10.1503/cjs.012519.
- Мурылев В.Ю., Руднев А.И., Куковенко Г.А. и др. Диагностика глубокой перипротезной инфекции тазобедренного сустава. *Травматология и ортопедия России*. 2022;28(3):123-135. doi: 10.17816/2311-2905-1797.
- Божкова С.А., Касимова А.Р., Тихилов Р.М. и др. Неблагоприятные тенденции в этиологии ортопедической инфекции: результаты 6-летнего мониторинга структуры и резистентности ведущих возбудителей. *Травматология и ортопедия России*. 2018;24(4):20-31. doi: 10.21823/2311-2905-2018-24-4-20-31.
- Афиногентова А.Г. Даровская Е.Н. Микробные биопленки ран: состояние вопроса *Травматология и ортопедия России*. 2011;17(3):119-125. doi: 10.21823/2311-2905-2011-0-3-119-125.
- Adams K, Couch L, Cierny G, et al. In vitro and in vivo evaluation of antibiotic diffusion from antibiotic-impregnated polymethylmethacrylate beads. *Clin Orthop Relat Res*. 1992;(278):244-252.
- Ермаков А.М., Ключин Н.М., Абабков Ю.В. и др. Оценка эффективности двухэтапного хирургического лечения больных с перипротезной инфекцией коленного и тазобедренного суставов. *Гений ортопедии*. 2018;24(3):321-326. doi: 10.18019/1028-4427-2018-24-3-321-326.
- Ермаков А., Ключин Н., Абабков Ю. и др. Одноэтапное ревизионное эндопротезирование при лечении перипротезной инфекции тазобедренного сустава. *Гений ортопедии*. 2019;25(2):172-179. doi: 10.18019/1028-4427-2019-25-2-172-179.
- Середа А.П., Богдан В.Н., Андрианова М.А., Беренштейн М. Лечение перипротезной инфекции: где и кто? *Травматология и ортопедия России*. 2019;25(4):33-55. doi: 10.21823/2311-2905-2019-25-4-33-55.
- Божкова С.А., Новокшопова А.А., Конев В.А. Современные возможности локальной антибиотикотерапии перипротезной инфекции и остеомиелита (обзор литературы). *Травматология и ортопедия России*. 2015;31(3):92-107. doi: 10.21823/2311-2905-2015-0-3-92-107.
- Мурылев В.Ю., Парвизи Д., Руднев А.И. и др. Результаты интраоперационного применения альфа-дефензин экспресс-теста при выполнении второго этапа РЭТС. *Гений ортопедии*. 2024;30(6):811-821. doi: 10.18019/1028-4427-2024-30-6-811-821.
- Вильямс Д.Ф., Роуф Р. *Имплантаты в хирургии*: Пер. с англ. М.: Медицина; 1978:552.
- Прохоренко В.М., Павлов В.В. *Инфекционные осложнения при эндопротезировании тазобедренного сустава*. Новосибирск: Наука; 2010:179.
- Abdullah NN, Abdullah H, Ramlee MH. Current trend of lattice structures designed and analysis for porous hip implants: A short review. *Materials Today Proceedings*. 2023. doi: 10.1016/j.matpr.2023.09.199.
- Kharin N, Bolshakov P, Kuchumov AG. Numerical and Experimental Study of a Lattice Structure for Orthopedic Applications. *Materials (Basel)*. 2023;16(2):744. doi: 10.3390/ma16020744.
- Kladovasilakis N, Tsongas K, Tzetzis D. Finite Element Analysis of Orthopedic Hip Implant with Functionally Graded Bioinspired Lattice Structures. *Biomimetics (Basel)*. 2020;5(3):44. doi: 10.3390/biomimetics5030044.
- Luo S, Jiang T, Long L, et al. A dual PMMA/calcium sulfate carrier of vancomycin is more effective than PMMA-vancomycin at inhibiting *Staphylococcus aureus* growth in vitro. *FEBS Open Bio*. 2020;10(4):552-560. doi: 10.1002/2211-5463.12809.
- Wall V, Nguyen TH, Nguyen N, Tran PA. Controlling Antibiotic Release from Polymethylmethacrylate Bone Cement. *Biomedicines*. 2021;9(1):26. doi: 10.3390/biomedicines9010026.
- Mensah LM, Love BJ. A meta-analysis of bone cement mediated antibiotic release: Overkill, but a viable approach to eradicate osteomyelitis and other infections tied to open procedures. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*. 2021;123:111999. doi: 10.1016/j.msec.2021.111999.
- Paz E, Sanz-Ruiz P, Abenojar J, et al. Evaluation of Elution and Mechanical Properties of High-Dose Antibiotic-Loaded Bone Cement: Comparative "In Vitro" Study of the Influence of Vancomycin and Cefazolin. *J Arthroplasty*. 2015;30(8):1423-1429. doi: 10.1016/j.arth.2015.02.040.
- Меликова Р.Э., Цискарашвили А.В., Артюхов А.А., Сокурова Н.В. In vitro исследование динамики элюции антибактериальных препаратов, импрегнированных в матрицы на основе полимерного гидрогеля. *Гений ортопедии*. 2023;29(1):64-70. doi: 10.18019/1028-4427-2023-29-1-64-70.

21. Miller R, McLaren A, Leon C, McLemore R. Mixing method affects elution and strength of high-dose ALBC: a pilot study. *Clin Orthop Relat Res*. 2012;470(10):2677-2683. doi: 10.1007/s11999-012-2351-2.
22. Samelis PV, Papagrigorakis E, Sameli E, et al. Current Concepts on the Application, Pharmacokinetics and Complications of Antibiotic-Loaded Cement Spacers in the Treatment of Prosthetic Joint Infections. *Cureus*. 2022;14(1):e20968. doi: 10.7759/cureus.20968.
23. Wu K, Chen YC, Hsu YM, Chang CH. Enhancing Drug Release From Antibiotic-loaded Bone Cement Using Porogens. *J Am Acad Orthop Surg*. 2016;24(3):188-195. doi: 10.5435/JAAOS-D-15-00469.
24. Shi M, Kretlow JD, Spicer PP, et al. Antibiotic-releasing porous polymethylmethacrylate/gelatin/antibiotic constructs for craniofacial tissue engineering. *J Control Release*. 2011;152(1):196-205. doi: 10.1016/j.jconrel.2011.01.029.
25. Spicer PP, Shah SR, Henslee AM, et al. Evaluation of antibiotic releasing porous polymethylmethacrylate space maintainers in an infected composite tissue defect model. *Acta Biomater*. 2013;9(11):8832-8839. doi: 10.1016/j.actbio.2013.07.018.
26. Миронов С.П., Цискарашвили А.В., Горбатюк Д.С. Хронический посттравматический остеомиелит как проблема современной травматологии и ортопедии (обзор литературы). *Гений ортопедии*. 2019;25(4):610-621. doi: 10.18019/1028-4427-2019-25-4-610-621.
27. Samelis PV, Papagrigorakis E, Sameli E, et al. Current Concepts on the Application, Pharmacokinetics and Complications of Antibiotic-Loaded Cement Spacers in the Treatment of Prosthetic Joint Infections. *Cureus*. 2022;14(1):e20968. doi: 10.7759/cureus.20968.
28. Perry NPI, Tucker NJ, Hadeed MM, et al. The Antibiotic Cement Bead Rouleaux: A Technical Trick to Maximize the Surface Area to Volume Ratio of Cement Beads to Improve the Elution of Antibiotics. *J Orthop Trauma*. 2022;36(9):369-373. doi: 10.1097/BOT.0000000000002335.
29. Куропаткин Г.В., Ахтямов И.Ф. *Костный цемент в травматологии и ортопедии*. 2-е изд. Доп. и перераб. Казань: Издательство "ТаГраф"; 2014:188.
30. Стогов М.В., Шастов А.Л., Киреева Е.А., Тушина Н.В. Высвобождение антибиотиков из материалов для замещения постостеомиелитических дефектов кости. *Гений ортопедии*. 2024;30(6):873-880 doi: 10.18019/1028-4427-2024-30-6-873-880.

Статья поступила 31.01.2025; одобрена после рецензирования 18.02.2025; принята к публикации 31.03.2025.

The article was submitted 31.01.2025; approved after reviewing 18.02.2025; accepted for publication 31.03.2025.

Информация об авторах:

Ильдар Фуатович Ахтямов — доктор медицинских наук, профессор, ведущий научный сотрудник, заведующий кафедрой, главный научный сотрудник, yalta60@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4910-8835>;

Оскар Александрович Саченков — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, доцент, 4works@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8554-2938>, SPIN-код: 2926-2436;

Рашид Ахтасович Шафигулин — кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник, ассистент кафедры, врач — травматолог-ортопед, rashid221@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0008-6146-4470>, SPIN-код: 1458-1630;

Алина Эльвировна Галяутдинова — лаборант-исследователь, wiiskas15@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-0885-5994>, SPIN-код: 1458-1630;

Никита Вячеславович Харин — научный сотрудник, nik1314@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4850-143X>, SPIN-код: 3574-8161;

Игорь Алексеевич Беспалов — лаборант-исследователь, bespalovigora@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-8062-8733>, SPIN-код: 3574-8161;

Сергей Васильевич Бойчук — доктор медицинских наук, профессор, ведущий научный сотрудник, заведующий кафедрой, boichuksergei@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2415-1084>, SPIN-код: 8058-6246.

Information about the authors:

Ildar F. Akhtyamov — Doctor of Medical Sciences, Professor, Leading Researcher, Head of Department, Chief Researcher, yalta60@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4910-8835>;

Oskar A. Sachenkov — Candidate of Medical Sciences, Senior Researcher, Associate Professor, 4works@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8554-2938>, SPIN-code: 2926-2436;

Rashid A. Shafigulin — Candidate of Medical Sciences, Senior Researcher, Assistant Professor, orthopaedic surgeon, rashid221@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0008-6146-4470>, SPIN-code: 1458-1630;

Alina E. Galyautdinova — Research Assistant, wiiskas15@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-0885-5994>, SPIN-code: 1458-1630;

Nikita V. Kharin — Research Fellow, nik1314@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4850-143X>, SPIN-code: 3574-8161;

Igor A. Bespalov — Research Assistant, bespalovigora@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-8062-8733>, SPIN-code: 3574-8161;

Sergey V. Boychuk — Doctor of Medical Sciences, Professor, Leading Researcher, Head of Department, boichuksergei@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2415-1084>, SPIN-code: 8058-6246.

Вклад авторов:

Ахтямов А.Ф. — концепция и дизайн исследования, редактирование текста рукописи.

Саченков О.А. — научное руководство, разработка решетчатых структур, концепция и дизайн исследования, редактирование текста рукописи.

Шафигулин Р.А. — идея исследования, концепция и дизайн исследования, анализ и интерпретация данных, написание текста рукописи.

Галяутдинова А.Э. — сбор, анализ и интерпретация данных, написание текста рукописи.

Харин Н.В. — разработка решетчатых структур, статистическая обработка данных, анализ и интерпретация данных, написание текста рукописи.

Беспалов И.А. — разработка решетчатых структур, статистическая обработка данных.

Бойчук С.В. — сбор, анализ и интерпретация данных, редактирование текста рукописи.

Все авторы прочли и одобрили финальную версию рукописи статьи. Все авторы согласны нести ответственность за все аспекты работы, чтобы обеспечить надлежащее рассмотрение и решение всех возможных вопросов, связанных с корректностью и надежностью любой части работы.