

## Научная статья

УДК 616.71-004.8-018.46-002-089.844-74:615.33:616-092.4

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2026-32-2-237-243>

## Элюция из различных костных цементов ванкомицина и меропенема при их комбинированном применении

**М.В. Стогов** ✉, **А.Л. Шастов**, **Е.А. Киреева**, **Н.В. Тушина**

Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова, Курган, Россия

**Автор, ответственный за корреспонденцию:** Максим Валерьевич Стогов, [stogo\\_off@list.ru](mailto:stogo_off@list.ru)**Аннотация**

**Введение.** Насыщение материалов для заполнения костных дефектов антибактериальными препаратами используют для лечения пациентов с инфекционными осложнениями костной ткани и профилактики.

**Цель работы** — провести оценку скорости элюции ванкомицина и меропенема из костных цементов на основе полиметилметакрилата и полимеров полиуретанового ряда, импрегнированных в материал в составе комплекса.

**Материалы и методы.** В исследовании *in vitro* проведен сравнительный анализ кинетики высвобождения ванкомицина и меропенема из двух материалов: на основе полимеров полиуретанового ряда (серия ПУ) и полиметилметакрилата (серия ПММА). Антибиотики вносили в материал до начала их полимеризации в следующих пропорциях: группа 1 — полимер : антибиотик 10 г : 1 г (по 0,5 г ванкомицина + 0,5 г меропенема); группа 2 — полимер : антибиотик 10 г : 0,5 г (по 0,25 г ванкомицина + 0,25 г меропенема). Для контроля использовали образцы, нагруженные одним антибиотиком: группа 1в — полимер : антибиотик 10 г : ванкомицин 0,5 г; группа 1м — полимер : антибиотик 10 г : меропенем 0,5 г; группа 2в — полимер : антибиотик 10 г : ванкомицин 0,25 г; группа 2м — полимер : антибиотик 10 г : меропенем 0,25 г.

**Результаты.** Элюция ванкомицина из материала как на основе ПММА, так и на основе ПУ, загруженных смесью ванкомицин+меропенем, была больше по конечному объему и более длительной по времени, чем из материалов, содержащих один ванкомицин. В свою очередь, высвобождение меропенема из ПММА и ПУ, загруженных смесью ванкомицин+меропенем, было по объему меньше, чем из материалов, содержащих один меропенем.

**Обсуждение.** Применение комплекса ванкомицина и меропенема в составе костных цементов обнаруживает следующую особенность, — меропенем способствует высвобождению ванкомицина из изученных материалов, при этом собственная элюция меропенема снижается.

**Заключение.** Комбинирование нескольких антибиотиков в материалах для заполнения костных дефектов влияет на кинетику высвобождения антибиотиков в отличие от кинетики высвобождения антибиотиков, загруженных в материал в случае монотерапии.

**Ключевые слова:** остеомиелит, костные дефекты, костный цемент, антибиотики, кинетика элюции

**Для цитирования:** Стогов М.В., Шастов А.Л., Киреева Е.А., Тушина Н.В. Элюция из различных костных цементов ванкомицина и меропенема при их комбинированном применении. *Гений ортопедии*. 2026;32(2):237-243. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-2-237-243.



## Elution of vancomycin and meropenem and their combinations from various bone cement materials

M.V. Stogov✉, A.L. Shastov, E.A. Kireeva, N.V. Tushina

Ilizarov National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics, Kurgan, Russian Federation

**Corresponding author:** Maksim V. Stogov, [stogo\\_off@list.ru](mailto:stogo_off@list.ru)

### Abstract

**Introduction** Saturation of bone defect filling materials with antibacterial agents is used for the treatment of patients with infectious bone complications and for their prevention.

The **purpose** of the work was to evaluate the elution rate of vancomycin and meropenem from bone cements based on polymethyl methacrylate and polyurethane polymers impregnated into the material in their combination.

**Materials and methods** In an *in vitro* study, a comparative analysis of the kinetics of vancomycin and meropenem release from two materials was performed that were based on polyurethane polymers (PU series) and polymethyl methacrylate (PMMA series). Antibiotics were added to the materials before their polymerization in the following proportions: group 1 – polymer : antibiotic 10 g : 1 g (0.5 g vancomycin + 0.5 g meropenem); group 2 – polymer : antibiotic 10 g : 0.5 g (0.25 g vancomycin + 0.25 g meropenem). Samples loaded with one antibiotic were used as a control: group 1v – polymer : antibiotic 10 g : vancomycin 0.5 g; group 1m – polymer : antibiotic 10 g : meropenem 0.5 g; group 2v – polymer: antibiotic 10 g: vancomycin 0.25 g; group 2m – polymer: antibiotic 10 g: meropenem 0.25 g.

**Results** Vancomycin elution from both PMMA- and PU-based materials loaded with a vancomycin+meropenem was greater in final volume and longer in time than from materials containing vancomycin alone. Conversely, meropenem release from PMMA and PU loaded with a vancomycin + meropenem mixture was less in volume than from the materials containing meropenem alone.

**Discussion** The use of a vancomycin-meropenem complex in bone cements reveals the following feature: meropenem promotes the release of vancomycin from the studied materials, while the elution of meropenem itself is reduced.

**Conclusion** Combining antibiotics for impregnation into materials for bone defect filling has an impact on the kinetics of antibiotics release, unlike the release kinetics of an antibiotic loaded into the material as monotherapy.

**Keywords:** osteomyelitis, bone defect, bone cement, antibiotics, elution kinetics

**For citation:** Stogov MV, Shastov AL, Kireeva EA, Tushina NV. Elution of vancomycin and meropenem and their combinations from various bone cement materials. *Genij Ortopedii*. 2026;32(2):237-243. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-2-237-243.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в ортопедической хирургии для профилактики и в комплексном лечении пациентов с перипротезной инфекцией и остеомиелитом достаточно широко используют эффективную практику насыщения материалов для заполнения костных полостей и дефектов (так называемый костный цемент) различными антибиотиками [1–3]. Принцип такого подхода состоит в постепенном высвобождении антибиотика из материала для достижения более эффективной локальной терапевтической концентрации антибиотиков, чем при исключительно их парентеральном введении, а также снижения токсического воздействия антибиотиков на организм [4–6]. Технология применения костного цемента с антибиотиками оказалась достаточно эффективной при первичном эндопротезировании суставов для профилактики глубоких инфекций [7]. Поэтому внесение в костные цементы антибиотиков становится рутинной практикой. Расширение практики применения этой технологии связано с использованием большего спектра различных антибиотиков [8–10]. Дополнительным стимулом развития данного направления является прогностически негативная ситуация с увеличением количества выделяемых штаммов при остеомиелите, нарастание их устойчивости к антибиотикам, а также рост доли ассоциаций микроорганизмов у пациентов с хроническим остеомиелитом [11–13]. Решение этих задач может быть связано как с расширением спектра используемых материалов для замещения дефектов [14–16], так с применением комплекса антибиотиков, тропных как к грамположительной, так и к грамотрицательной флоре [17].

**Цель работы** — провести оценку скорости элюции ванкомицина и меропенема из костных цементов на основе полиметилметакрилата и полимеров полиуретанового ряда, импрегнированных в материал в составе комплекса.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В исследовании *in vitro* проведен сравнительный анализ кинетики высвобождения ванкомицина и меропенема (оба антибиотика производства ООО Промомед, Россия) из двух материалов:

- рекост на основе полимеров полиуретанового ряда (Н. Новгород, РЗН 2014/1646 от 03.07.2014, бессрочно) (серия ПУ);
- костный цемент (ПУ № ФСЗ 2012/11622 от 19.03.2012, бессрочно) на основе полиметилметакрилата (серия ПММА).

Из тестируемых материалов (согласно инструкции к их применению) формировали цилиндры высотой 7 мм и диаметром 4 мм. Антибиотики вносили в материал до начала их полимеризации в следующих пропорциях:

- группа 1 — полимер : антибиотик 10 г : 1 г (0,5 г ванкомицина + 0,5 г меропенема);
- группа 2 — полимер : антибиотик 10г : 0,5г (0,25 г ванкомицина + 0,25 г меропенема);

Для контроля использовали образцы, нагруженные одним антибиотиком:

- группа 1в — полимер : антибиотик 10 г : 0,5 г ванкомицина;
- группа 1м — полимер : антибиотик 10 г : 0,5 г меропенема;
- группа 2в — полимер : антибиотик 10 г : 0,25 г ванкомицина;
- группа 2м — полимер : антибиотик 10 г : 0,25 г меропенема.

Цилиндры инкубировали в 10 мл физиологического раствора в термостате при 37 °С. Инкубационный раствор (элюат) в течение первой недели меняли ежедневно, в последующем — раз в неделю. В каждой группе инкубировали по шесть образцов. Параллельно инкубировали образцы без антибиотика (нулевой контроль).

В каждой пробе инкубационного раствора спектрофотометрически, относительно стандартной калибровочной кривой, по интенсивности поглощения определяли концентрацию тестируемых антибиотиков: ванкомицин — при 280 нм, меропенем — при 298 нм. При расчетах концентрации опытных проб вычитали значения экстинкции в пробах нулевого контрольного материала (без антибиотиков). Инкубацию прекращали, когда в пробах в течение двух недель отмечали следовые количества антибиотиков.

Исследования выполнены с учетом рекомендаций, обозначенных в ГОСТе ISO 10993-13-2016 «Изделия медицинские. Оценка биологического действия медицинских изделий. Часть 13. Идентификация и количественное определение продуктов деструкции полимерных медицинских изделий».

В параллелях рассчитывали медиану и интерквартильный размах (Q1–Q3). Достоверность различий между группами оценивали с помощью W-критерия Вилкоксона для независимых выборок.

Работа выполнена в формате *in vitro* исследования без участия животных или человека, поэтому разрешение этического комитета на ее проведение не требовалось.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Динамика высвобождения ванкомицина из материалов серии ПММА и ПУ, насыщенных комплексом ванкомицин-меропенем в соотношении 0,5 + 0,5 г (группа 1), была практически одинакова, с максимальным высвобождением антибиотиков после первых суток инкубации (рис. 1). При этом объем высвобождающегося ванкомицина из материала на основе ПУ, насыщенного комплексом антибиотиков, был выше, чем из этого же материала, насыщенного только ванкомицином (группа 1в). При содержании антибиотиков в соотношении 0,25 + 0,25 г (группа 2) высвобождение ванкомицина было выше в серии ПММА, при этом элюция ванкомицина из материала на основе ПУ в группе 2в была заметно выше, чем в группе 2.

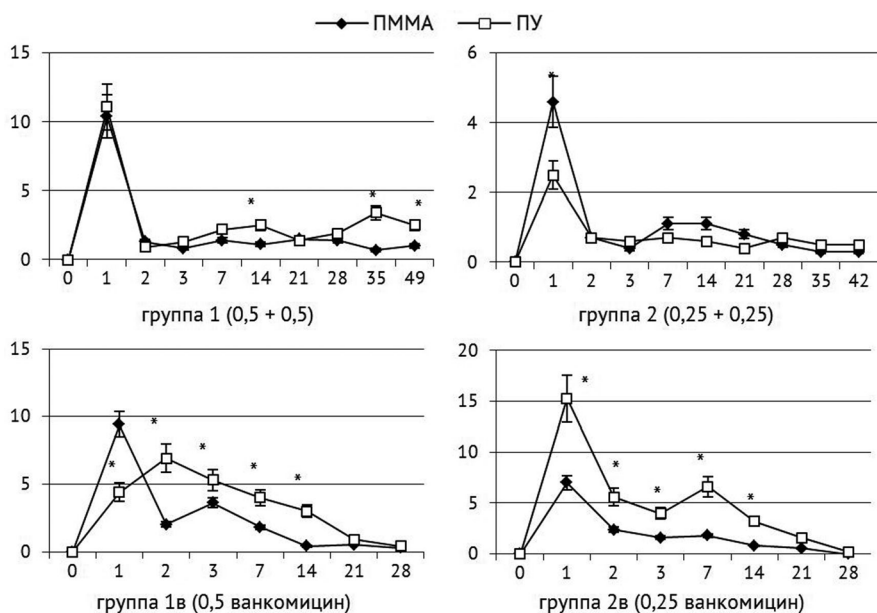


Рис. 1. Динамика высвобождения ванкомицина (% от общей массы введенного антибиотика) из тестируемых материалов (Me, интерквартильный размах); \* — достоверность различий между сериями при  $p < 0,05$ . По оси абсцисс — сутки инкубации

Высвобождение меропенема из материалов на основе ПММА и ПУ, насыщенных комплексом ванкомицин-меропенем в соотношении 0,5 : 0,5 г (группа 1), было практически одинаково, однако общий объем высвобождающегося меропенема из обоих материалов, насыщенных смесью антибиотиков, был в 1,5–2,0 раза ниже, чем из материалов, загруженных только меропенемом (рис. 2). В группе 2 высвобождение меропенема было выше в серии ПММА, в группе 2м, наоборот, — в серии материалов на основе ПУ. В целом стоит отметить, что объемы элюированного меропенема из обоих материалов, содержащих комплекс антибиотиков, были существенно ниже, чем из материалов, насыщенных монопрепаратом.

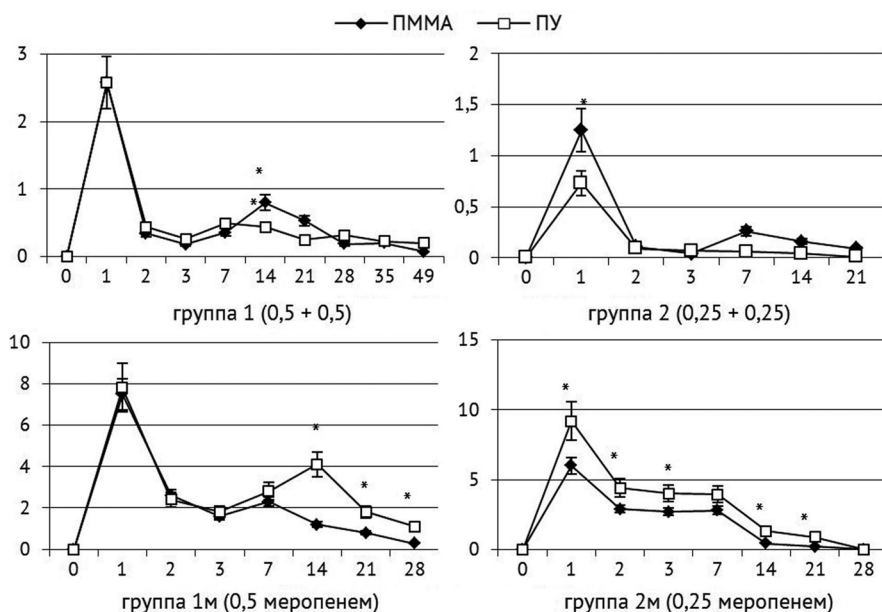


Рис. 2. Динамика высвобождения меропенема (% от общей массы введенного антибиотика) из тестируемых материалов (Me, интерквартильный размах); \* — достоверность различий между сериями при  $p < 0,05$ . По оси абсцисс — сутки инкубации

В целом общие характеристики элюции ванкомицина и меропенема при загрузке исследуемых материалов смесью данных антибиотиков в равном весовом соотношении отличались относительно высвобождения в моноварианте (табл. 1). Элюция ванкомицина как из материала ПММА, так и из материала на основе ПУ, загруженных смесью ванкомицин+меропенем, была больше по конечному объему и более длительной по времени, чем из материалов, содержащих только один ванкомицин. В свою очередь, высвобождение меропенема из ПММА и ПУ, загруженных смесью ванкомицин+меропенем, было по объему меньше, чем из материалов, содержащих один меропенем.

Таблица 1

Общие результаты кинетики высвобождения антибиотиков в разных концентрациях из материалов ПММА и ПУ (Медиана)

Антибиотик	Группа	L, сутки	V <sub>0</sub> , %	
			ПММА/ПУ	
Ванкомицин	1в (моно 0,5)	35/35	20,8/30,1	1(9,4)/1(4,4)
	1 (смесь 0,5)	77/63	45,7#/64,4**	1(10,4)/1(11,1)
	2в (моно 0,25)	21/21	13,8/33,6*	1(7,0)/1(14,7)
	2 (смесь 0,25)	42/42	42,0#/32,9	1(18,3)/1(10,0)
Меропенем	1м (моно 0,5)	28/28	16,5/21,5	1(7,5)/1(7,7)
	1 (смесь 0,5)	56/56	11,6#/12,5#	1(5,2)/1(5,2)
	2м (моно 0,25)	14/14	15,3/23,4	1(5,9)/1(9,1)
	2 (смесь 0,25)	21/14	8,1#/4,0**	1(5,0)/1(2,9)

Примечание: L — длительность высвобождения антибиотика; V<sub>0</sub> — суммарный объем высвободившегося антибиотика в % относительно всего импрегнированного объема; Max — срок наблюдения (в сутках) когда отмечался максимальный объем высвободившегося антибиотика и в скобках процент этого высвободившегося антибиотика относительно всего импрегнированного антибиотика; \* — различия между ПММА и ПУ достоверны при  $p < 0,05$ ; # — достоверные отличия от группы монотерапии при  $p < 0,05$ .

## ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты настоящего исследования демонстрируют, что кинетика высвобождения ванкомицина и меропенема при загрузке материалов для замещения постостеомиелитических дефектов смесью данных антибиотиков в равном весовом соотношении отличалась от кинетики высвобождения в случае, когда в материал загружали один антибиотик. В частности, высвобождение ванкомицина из обоих изученных материалов в случае их загрузки смесью ванкомицин + меропенем было больше, чем из материалов, содержащих один ванкомицин. При этом высвобождение ванкомицина из материала на основе ПУ было более эффективным, чем из ПММА. В свою очередь, высвобождение меропенема из обоих изученных материалов в случае их загрузки смесью ванкомицин + меропенем было менее эффективно, чем из материалов, насыщенных только меропенемом.

Имеющиеся литературные данные в основном посвящены элюции монопрепаратов антибиотиков, импрегнированных в костный цемент на основе ПММА [8–10]. Нами встречена единственная работа, в которой изучена элюция исследуемой нами смеси антибиотиков. Отмечено, что элюирование ванкомицина из акрилового цемента не зависело от присутствия меропенема [18]. Эти результаты близки к нашим данным, поэтому можно констатировать, что применение комплекса ванкомицина и меропенема в составе костных цементов обнаруживает следующую особенность, — один антибиотик (меропенем) способствует высвобождению другого (ванкомицин), при этом собственная элюция меропенема снижается.

В целом, практически все аналогичные исследования кинетики высвобождения различных комбинаций антибиотиков в составе костных цементов отмечают общее правило, — комбинация антибиотиков в составе материалов для замещения инфицированных дефектов кости изменяет характеристики высвобождения всех входящих в состав антибактериальных компонентов, как усиливая, так и ослабляя их элюцию [19, 20]. Показано, что при сочетании гентамицина и ванкомицина отмечается синергетический эффект, — элюция обоих антибиотиков при совместной загрузке в костный цемент увеличивается [21]. При сочетании тобрамицина и ванкомицина увеличивается высвобождение ванкомицина по сравнению с высвобождением ванкомицина в чистом виде [22]. Случаи усиления/ослабления элюции отдельных антибиотиков описаны и для комплексов, состоящих из трех антибиотиков (цефазолина, гентамицин, ванкомицин) [23].

Дозозависимые особенности элюции антибиотиков по результатам нашего исследования следующие: для обоих использованных материалов наблюдали прямую зависимость между исходной концентрацией импрегнированных антибиотиков и объемами их элюции, при этом зависимость доза/элюция носила нелинейный характер, что также согласуется с литературными данными [24].

Кинетика высвобождения антибиотиков в зависимости от исходного соотношения масс комбинируемых антибиотиков в цементе изучена достаточно слабо, хотя и здесь сохраняется общая закономерность, — повышение доли отдельного антибиотика может менять (усиливать или снижать) профиль кинетики другого антибиотика [25].

Кроме того, на кинетику элюции антибиотиков, как показывают наши исследования и литературные данные, может влиять состав материала, используемого для замещения костных дефектов [26, 27], и его вязкость [28].

Поэтому в целом можно заключить, что каждое сочетание антибиотиков и каждая марка цемента демонстрирует свой уникальный профиль высвобождения антибиотиков [24]. Эти обстоятельства серьезно затрудняют выбор материала и комбинации антибиотиков на практике. С учетом того, что профиль кинетики антибиотиков определяется также составом цемента, выбор материала и используемых антибиотиков в клинических условиях может представлять существенную сложность и нести достаточные риски того, что антибактериальная эффективность применения импрегнированных антибиотиками костных цементов для замещения постостеомиелитических дефектов будет ниже ожидаемой. Поэтому на данном этапе наиболее доступным выглядит подход, при котором образец костного цемента с антибиотиками перед применением в клинике тестируют по показателям эффективности (элюция и антибактериальная чувствительность) в исследовании *in vitro*, чтобы убедиться в том, что комбинация антибиотиков подходит для выбранного цемента [24].

Для повышения элюции антибиотиков из костных цементов свое применение могут найти подходы, связанные с дополнительной модификацией материала за счет его химической модификации, использования различных армирующих элементов, насыщения материала антимикробными средствами, не относящимися к антибиотикам [29–32].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комбинирование нескольких антибиотиков в материалах для заполнения костных дефектов как на основе полиметилметакрилата, так и полимеров полиуретанового ряда влияет на скорость элюции антибиотиков в отличие от скорости высвобождения антибиотиков, загруженных в материал в случае монотерапии. В частности, меропенем в составе комплекса с ванкомицином увеличивает скорость высвобождения ванкомицина.

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

**Источник финансирования.** Работа выполнена в рамках темы государственного задания на осуществление научных исследований «Разработка временных биорезорбируемых антибактериальных носителей для замещения постостеомиелитических дефектов костей нижних конечностей» (2024–2026 гг.).

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сергеев Г.К., Кирпичев И.В., Мальчевский В.А. и др. Современные направления стратегии профилактики и лечения периплантатной инфекции и послеоперационного остеомиелита. *Медицинская наука и образование Урала*. 2024;25(1):137–144. doi: 10.36361/18148999.2024.25.1.137.
2. 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.
3. Xu T, Wu KL, Jie K. Comprehensive meta-analysis of antibiotic-impregnated bone cement versus plain bone cement in primary total knee arthroplasty for preventing periprosthetic joint infection. *Chin J Traumatol*. 2022;25(6):325–330. doi: 10.1016/j.cjtee.2022.06.001.
4. Cara A, Ferry T, Laurent F, Josse J. Prophylactic Antibiofilm Activity of Antibiotic-Loaded Bone Cements against Gram-Negative Bacteria. *Antibiotics (Basel)*. 2022;11(2):137. doi: 10.3390/antibiotics11020137.
5. Dantas LR, Ortis GB, Suss PH, Tuon FF. Advances in Regenerative and Reconstructive Medicine in the Prevention and Treatment of Bone Infections. *Biology (Basel)*. 2024;13(8):605. doi: 10.3390/biology13080605.
6. Jiang C, Zhu G, Liu Q. Current application and future perspectives of antimicrobial degradable bone substitutes for chronic osteomyelitis. *Front Bioeng Biotechnol*. 2024;12:1375266. doi: 10.3389/fbioe.2024.1375266.
7. Martínez-Moreno J, Merino V, Nacher A, et al. Antibiotic-loaded Bone Cement as Prophylaxis in Total Joint Replacement. *Orthop Surg*. 2017;9(4):331–341. doi: 10.1111/os.12351.
8. 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.
9. Levack AE, Turajane K, Yang X, et al. Thermal Stability and *in Vitro* Elution Kinetics of Alternative Antibiotics in Polymethylmethacrylate (PMMA) Bone Cement. *J Bone Joint Surg Am*. 2021;103(18):1694–1704. doi: 10.2106/JBJS.20.00011.
10. Wang LH, Feng YD, Zhang XW, et al. Elution and Biomechanical Properties of Meropenem-Loaded Bone Cement. *Orthop Surg*. 2021;13(8):2417–2422. doi: 10.1111/os.13139.
11. Ермаков А.М., Богданова Н.А., Матвеева Е.Л., Гасанова А.Г. Анализ микробного пейзажа у пациентов с перипротезной инфекцией тазобедренного сустава. *Гений ортопедии*. 2025;31(3):307–313. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-3-307-313.
12. Цискарашвили А.В., Меликова Р.Э., Назаренко А.Г. Результаты микробиологического мониторинга ведущих возбудителей при инфицированных переломах длинных костей в условиях чрескостного остеосинтеза. *Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова*. 2025;32(2):457–475. doi: 10.17816/vto655983.
13. Шипицына И.В., Осипова Е.В. Роль анаэробной микрофлоры в этиологии хронического остеомиелита. *Клиническая лабораторная диагностика*. 2024;69(2):92–96. doi: 10.51620/0869-2084-2024-69-2-92-96.

14. Судницын А.С., Шастов А.Л., Ключин Н.М., Рашидов Г.Х. Первый опыт применения частично биорезорбируемого костно-замещающего материала у больного хроническим остеомиелитом большеберцовой кости 34-летней давности заболевания. *Гений ортопедии*. 2025;31(1):60-65. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-1-60-65.
15. Smith M, Roberts M, Al-Kassas R. Implantable drug delivery systems for the treatment of osteomyelitis. *Drug Dev Ind Pharm*. 2022;48(10):511-527. doi: 10.1080/03639045.2022.2135729.
16. Zegre M, Poljańska E, Caetano LA, et al. Research progress on biodegradable polymeric platforms for targeting antibiotics to the bone. *Int J Pharm*. 2023;648:123584. doi: 10.1016/j.ijpharm.2023.123584.
17. Lin H, Gao Z, Shan T, et al. A review on the promising antibacterial agents in bone cement-From past to current insights. *J Orthop Surg Res*. 2024;19(1):673. doi: 10.1186/s13018-024-05143-7.
18. Andollina A, Bertoni G, Zolezzi C, et al. Vancomycin and meropenem in acrylic cement: elution kinetics of *in vitro* bactericidal action. *Chir Organi Mov*. 2008;91(3):153-158. doi: 10.1007/s12306-007-0025-0.
19. Funk GA, Burkes JC, Cole KA, et al. Antibiotic Elution and Mechanical Strength of PMMA Bone Cement Loaded With Borate Bioactive Glass. *J Bone Jt Infect*. 2018;3(4):187-196. doi: 10.7150/jbji.27348.
20. Slane J, Gietman B, Squire M. Antibiotic elution from acrylic bone cement loaded with high doses of tobramycin and vancomycin. *J Orthop Res*. 2018;36(4):1078-1085. doi: 10.1002/jor.23722.
21. Hsieh PH, Tai CL, Lee PC, Chang YH. Liquid gentamicin and vancomycin in bone cement: a potentially more cost-effective regimen. *J Arthroplasty*. 2009;24(1):125-130. doi: 10.1016/j.arth.2008.01.131.
22. Penner MJ, Masri BA, Duncan CP. Elution characteristics of vancomycin and tobramycin combined in acrylic bone-cement. *J Arthroplasty*. 1996;11(8):939-944. doi: 10.1016/s0883-5403(96)80135-5.
23. 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.
24. Fraval A, Zhou Y, Parvizi J. Antibiotic-loaded cement in total joint arthroplasty: a comprehensive review. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2024;144(12):5165-5175. doi: 10.1007/s00402-024-05328-z.
25. von Hertzberg-Boelch SP, Luedemann M, Rudert M, Steinert AF. PMMA Bone Cement: Antibiotic Elution and Mechanical Properties in the Context of Clinical Use. *Biomedicines*. 2022;10(8):1830. doi: 10.3390/biomedicines10081830.
26. Coraça-Huber D, Humez M, Kühn KD. A Comparative Study of Extended Gentamicin and Tobramycin Release and Antibacterial Efficacy from Palacos and Simplex Acrylic Cements. *Microorganisms*. 2025;13(9):2174. doi: 10.3390/microorganisms13092174.
27. Si L, Zhang W, Jiang H, et al. Dual antibiotic PLGA microspheres for the treatment of traumatic osteomyelitis. *Sci Rep*. 2025;15(1):30694. doi: 10.1038/s41598-025-14824-0.
28. Dietz MJ, McGowan BM, Thomas DD, et al. Does Cement Viscosity Impact Antibiotic Elution and *In Vitro* Efficacy Against Common Prosthetic Joint Infection Pathogens? *Clin Orthop Relat Res*. 2025;483(3):488-497. doi: 10.1097/CORR.0000000000003272.
29. Божкова С.А., Гаджимогомедов М.Ш., Гордина Е.М. и др. Экспериментальное обоснование комбинаций антимикробных препаратов для импрегнации костного цемента. *Травматология и ортопедия России*. 2025;31(1):76-84. doi: 10.17816/2311-2905-17665.
30. Kazmi SAD, Soomro T, Soomro R, et al. Impact of Biofilms on Surface Properties of Polymethyl Methacrylate (PMMA) Resins. *J Basic Microbiol*. 2024;64(12):e2400460. doi: 10.1002/jobm.202400460.
31. Kreve S, Cândido Dos Reis A. Antibiofilm capacity of PMMA surfaces: A review of current knowledge. *Microb Pathog*. 2025;202:107426. doi: 10.1016/j.micpath.2025.107426.
32. Tseng TH, Chang CH, Chen CL, et al. A simple method to improve the antibiotic elution profiles from polymethylmethacrylate bone cement spacers by using rapid absorbable sutures. *BMC Musculoskelet Disord*. 2022;23(1):916. doi: 10.1186/s12891-022-05870-0.

Статья поступила 19.01.2025; одобрена после рецензирования 26.01.2025; принята к публикации 09.02.2026.

The article was submitted 19.01.2025; approved after reviewing 26.01.2025; accepted for publication 09.02.2026.

#### Информация об авторах:

Максим Валерьевич Стогов — доктор биологических наук, доцент, руководитель отдела, stogo\_off@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8516-8571>;

Александр Леонидович Шастов — кандидат медицинских наук, врач — травматолог-ортопед, старший научный сотрудник, alshastov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7434-1404>;

Елена Анатольевна Киреева — кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, ea\_tkachuk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1006-5217>;

Наталья Владимировна Тушина — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, ntushina76@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1322-608X>.

#### Information about the authors:

Maksim V. Stogov — Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Head of Department, stogo\_off@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8516-8571>;

Alexander L. Shastov — Candidate of Medical Sciences, orthopaedic surgeon, Senior Researcher, alshastov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7434-1404>;

Elena A. Kireeva — Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher, ea\_tkachuk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1006-5217>;

Natalia V. Tushina — Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, ntushina76@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1322-608X>.