

Сравнение эффективности методик Masquelet, костного транспорта по Илизарову и кровоснабжаемых лоскутов при замещении обширных дефектов длинных костей конечностей: систематический обзор и метаанализ

А.И. Авдеев¹, Ю.А. Федорова¹, А.Б. Малашичева², Д.А. Сердюкова², П.М. Докшин², С.А. Божкова¹

¹ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Р.Р. Вредена» Минздрава России, г. Санкт-Петербург, Россия

²ФГБУН «Институт цитологии Российской академии наук», г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат


Цель метаанализа — сравнить клинические результаты и осложнения при замещении обширных дефектов длинных костей конечностей различной этиологии у пациентов старше 18 лет с помощью техники Masquelet, методики костного транспорта по Илизарову и реконструктивных вмешательств с применением свободных кровоснабжаемых костных лоскутов.


Материал и методы. Поиск публикаций осуществлен в базах данных eLIBRARY, PubMed, Embase, Cochrane Central Register of Controlled Trials, Google Scholar за период с 2015 по 2025 г. В анализ включены РКИ и когортные исследования, посвященные замещению обширных дефектов костей конечностей с помощью различных техник: Masquelet (ТМ), костного транспорта (МКТ) и свободных кровоснабжаемых лоскутов, в частности малоберцового кровоснабжаемого трансплантата.

Результаты. Для метаанализа с целью оценки эффективности и безопасности методик было отобрано 9 публикаций, включавших данные о 375 пациентах. Преобладали описания повреждений длинных костей нижних конечностей ($n = 332$; 87%), наиболее часто – большеберцовой кости ($n = 284$; 74%), на втором месте по частоте – повреждение бедренной кости ($n = 48$; 13%). Среди повреждений верхних конечностей описаны обширные костные дефекты предплечья ($n = 44$; 12%), плечевой кости ($n = 4$; 1%). Общая продолжительность фиксации в группах пациентов после ТМ и СКЛ, а также ТМ и МКТ статистически значимо не различалась ($p = 0,76$ и $p = 0,40$ соответственно). Доля пациентов с полной консолидацией, достигнутой без дополнительных хирургических вмешательств, при применении МКТ в сравнении с ТМ была статистически значимо выше (86% против 61%, $p = 0,02$). При оценке частоты распространенности инфекций области хирургического вмешательства (ИОХВ) были выявлены следующие особенности: доля пациентов с поверхностной формой ИОХВ была ниже ($p = 0,0004$) для ТМ в сравнении с МКТ (11% и 23% соответственно). И напротив, частота глубокой ИОХВ для ТМ оказалась выше ($p = 0,04$) в сравнении с КТ – 15% и 8% соответственно. Статистически значимые различия по частоте несращений и конверсии хирургического вмешательства в ампутацию выявлены не были. Доля пациентов, достигших отличных и хороших результатов по шкале ASAMI, составила 85% для ТМ и 71% для МКТ, различия не были статистически значимыми ($p = 0,48$).

Заключение. Систематический обзор литературы подтвердил эффективность всех трех методов: техники Masquelet, костного транспорта по Илизарову и использования свободных кровоснабжаемых лоскутов. Метаанализ не выявил значимого преимущества ни одного из методов по срокам фиксации и консолидации, однако обнаружил характерные профили безопасности, которые должны учитываться при выборе тактики. При выборе метода замещения крупных сегментарных дефектов следует учитывать локализацию и протяженность дефекта, статус мягких тканей, активность инфекционного процесса, а также индивидуальные характеристики пациента, в частности его приверженность лечению и ожидания в отношении качества жизни.

Ключевые слова: техника Masquelet; индуцированная мембрана; костный транспорт; свободный кровоснабжаемый костный лоскут; открытый перелом; несращение; остеомиелит; дефект кости.

 **Для цитирования:** Авдеев А.И., Федорова Ю.А., Малашичева А.Б., Сердюкова Д.А., Докшин П.М., Божкова С.А. Сравнение эффективности методик Masquelet, костного транспорта по Илизарову и кровоснабжаемых лоскутов при замещении обширных дефектов длинных костей конечностей: систематический обзор и метаанализ. *Травматология и ортопедия России*. 2026;32(1):170-185. <https://doi.org/10.17816/2311-2905-17811>.

 Авдеев Александр Игоревич; e-mail: spaceship1961@gmail.com

Рукопись получена: 22.11.2025. Рукопись одобрена: 26.01.2026. Статья опубликована онлайн: 05.03.2026.

© Эко-Вектор, 2026



Comparative Effectiveness of the Masquelet Technique, the Ilizarov Method, and Vascularized Bone Flaps in the Reconstruction of Extensive Long-Bone Defects of the Limbs: A Systematic Review and Meta-Analysis

Alexandr I. Avdeev¹, Yulia A. Fedorova¹, Anna B. Malashicheva², Daria A. Serdiukova², Pavel M. Docshin², Svetlana A. Bozhkova¹

¹ Vreden National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics, St. Petersburg, Russia

² Institute of Cytology, Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

Abstract

The aim of this meta-analysis – to compare clinical outcomes and complications of the reconstruction of extensive long-bone defects of the limbs of various etiologies in patients older than 18 years using the Masquelet technique, the Ilizarov bone transport, and reconstructive procedures with vascularized bone flaps.

Methods. Publications were searched in the eLIBRARY, PubMed, Embase, Cochrane Central Register of Controlled Trials, and Google Scholar databases for the period 2015–2025. Randomized controlled trials and cohort studies addressing the reconstruction of extensive bone defects of the limbs using different techniques (the Masquelet technique (MT), bone transport (BT), and free vascularized flaps (FVF), particularly the fibular graft) were included in the analysis.

Results. Nine publications involving a total of 375 patients were included in the meta-analysis to assess the effectiveness and safety of the techniques. The majority of cases involved long bones of the lower limbs ($n = 332$; 87%), most commonly the tibia ($n = 284$; 74%), followed by the femur ($n = 48$; 13%). Among upper limb injuries, extensive bone defects of the forearm were reported in 44 cases (12%) and of the humerus in 4 cases (1%). The overall duration of fixation did not differ significantly between MT and FVF groups, nor between MT and BT groups ($p = 0.76$ and $p = 0.40$, respectively). The proportion of patients achieving complete bone union without additional surgical interventions was significantly higher with BT compared to MT (86% vs. 61%, $p = 0.02$). The analysis of surgical site infection (SSI) rates revealed the following patterns: the proportion of patients with superficial SSI was significantly lower with MT compared to BT (11% vs. 23%, $p = 0.0004$). Conversely, the incidence of deep SSI was significantly higher with MT compared to BT (15% vs. 8%, $p = 0.04$). No statistically significant differences were found regarding nonunion rates or the conversion of surgical treatment to amputation. The proportion of patients with excellent or good outcomes according to the ASAMI score was 85% for MT and 71% for BT; however, the difference was not statistically significant ($p = 0.48$).

Conclusion. The systematic literature review confirmed the effectiveness of all three methods: the Masquelet technique, the Ilizarov bone transport, and free vascularized flaps. The meta-analysis did not reveal a significant advantage of any single method in terms of fixation time or time to union; however, distinct safety profiles were identified and should be considered when selecting the surgical strategy. When choosing a technique for the reconstruction of large segmental bone defects, it is essential to take into account the defect location and length, soft tissue status, the presence and activity of infection, as well as individual patient characteristics, particularly treatment adherence and expectations regarding the quality of life.

Keywords: Masquelet technique; induced membrane; bone transport; free vascularized bone flap; open fracture; nonunion; osteomyelitis; bone defect.

Cite as: Avdeev A.I., Fedorova Yu.A., Malashicheva A.B., Serdiukova D.A., Docshin P.M., Bozhkova S.A. Comparative Effectiveness of the Masquelet Technique, the Ilizarov Method, and Vascularized Bone Flaps in the Reconstruction of Extensive Long-Bone Defects of the Limbs: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Traumatology and Orthopedics of Russia*. 2026;32(1):170–185. (In Russian). <https://doi.org/10.17816/2311-2905-17811>.

✉ Alexandr I. Avdeev; e-mail: spaceship1961@gmail.com

Submitted: 22.11.2025. Accepted: 26.01.2026. Published online: 05.03.2026.

© Eco-Vector, 2026

ВВЕДЕНИЕ

Согласно данным литературы, ежегодная численность пациентов с обширными костными дефектами различной этиологии превышает 20 миллионов человек и имеет тенденцию к росту [1, 2].

Особую сложность представляют сегментарные дефекты длинных костей конечностей типа С в соответствии с Универсальной классификацией дефектов трубчатых костей [3]. Как правило, такие дефекты возникают на фоне высокоэнергетических повреждений и зачастую сопряжены с массивной контаминацией раны микроорганизмами, что приводит к необходимости длительного многоэтапного лечения и ассоциировано с высоким риском осложнений, преимущественно инфекционного характера [4].

К современным методам лечения данной патологии относятся замещение костных дефектов с помощью дистракционного остеогенеза по методу Г.А. Илизарова (костный транспорт — КТ), применение остеоиндуктивной мембраны, или техника Masquelet (ТМ) и свободная пересадка кровоснабжаемых костно-мышечных комплексов тканей (преимущественно свободного малоберцового лоскута — СМЛ), а также различные варианты активно развивающихся биоинженерных технологий [5, 6].

Несмотря на наличие тематических обзорных статей, включая систематические обзоры литературы и метаанализы [6, 7, 8, 9], на сегодняшний день не представлен единый научно обоснованный подход к выбору тактики замещения обширных дефектов длинных костей конечностей. В связи с этим проблема лечения пациентов с обширными сегментарными дефектами костей остается чрезвычайно актуальной задачей.

Цель метаанализа — сравнить клинические результаты и осложнения при замещении обширных дефектов длинных костей конечностей различной этиологии у пациентов старше 18 лет с помощью техники Masquelet, методики костного транспорта по Илизарову и реконструктивных вмешательств с применением свободных кровоснабжаемых костных лоскутов.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Стратегия поиска

Систематический обзор литературы был выполнен с соблюдением международных рекомендаций о предпочтительных элементах отчетности для систематических обзоров и метаанализов (PRISMA 2020) [10]. Ключевые вопросы и цель обзора, стратегия поиска информации, критерии включения и исключения, алгоритмы скрининга, оценки источников, синтеза информации и риска систематических ошибок, а также способы разрешения разногласий были определены до проведения обзора, отражены в предварительно сформированном

протоколе исследования и не подлежали изменению в ходе его проведения. Протокол планируемого обзора не был предварительно опубликован или внесен в какой-либо регистр.

Поиск подходящих публикаций осуществлен в базах данных eLIBRARY, PubMed (MEDLINE), Embase (Ovid), Cochrane Central Register of Controlled Trials (CENTRAL), Google Scholar с использованием логических операторов и ключевых слов. Для англоязычных источников формулировался запрос: («Masquelet» OR «induced membrane») AND («Ilizarov technique» OR «bone transport» OR «distraction osteogenesis») OR («vascularized bone graft» OR «vascularized fibula graft»). Для русскоязычных источников аналогичным образом с применением ключевых слов: Masquelet, индуцированная мембрана, методика Илизарова, костный транспорт, свободный кровоснабжаемый костный лоскут. Поиск публикаций, отбор работ и извлечение данных осуществлены двумя исследователями в режиме параллельной работы. При возникновении разногласий относительно включения публикации в метаанализ решение принималось на основании обсуждения при участии всего авторского коллектива. Временной интервал поиска составил 10 лет (2015–2025). Последняя дата поискового запроса 20.05.2025.

Следующим этапом после поиска информации по заголовкам и аннотациям в представленных базах данных был произведен ручной отбор подходящих полнотекстовых публикаций, соответствующих критериям включения. Стратегия поиска и количество исключенных публикаций с указанием причин отражены на рисунке 1.

Отбор публикаций

В обзор включали клинические исследования, ответствовавшие перечисленным ниже критериям, определенным с использованием алгоритма PICOS [11] (табл. 1).

Критерии включения:

- 1) пациенты 18 лет и старше, которым осуществляли замещение обширного дефекта костной ткани (более 2 см) с применением техники Masquelet вне зависимости от этиологии и локализации костного дефекта; группа сравнения — применение свободного кровоснабжаемого лоскута либо методики Илизарова;
- 2) тип исследования: рандомизированные контролируемые исследования (РКИ), ретроспективные и проспективные когортные исследования (уровень доказательности 1–2);
- 3) наличие данных хотя бы одного из следующих исходов лечения: продолжительность фиксации, сроки консолидации, срок достижения опороспособности конечности, функциональная оценка, послеоперационные осложнения.

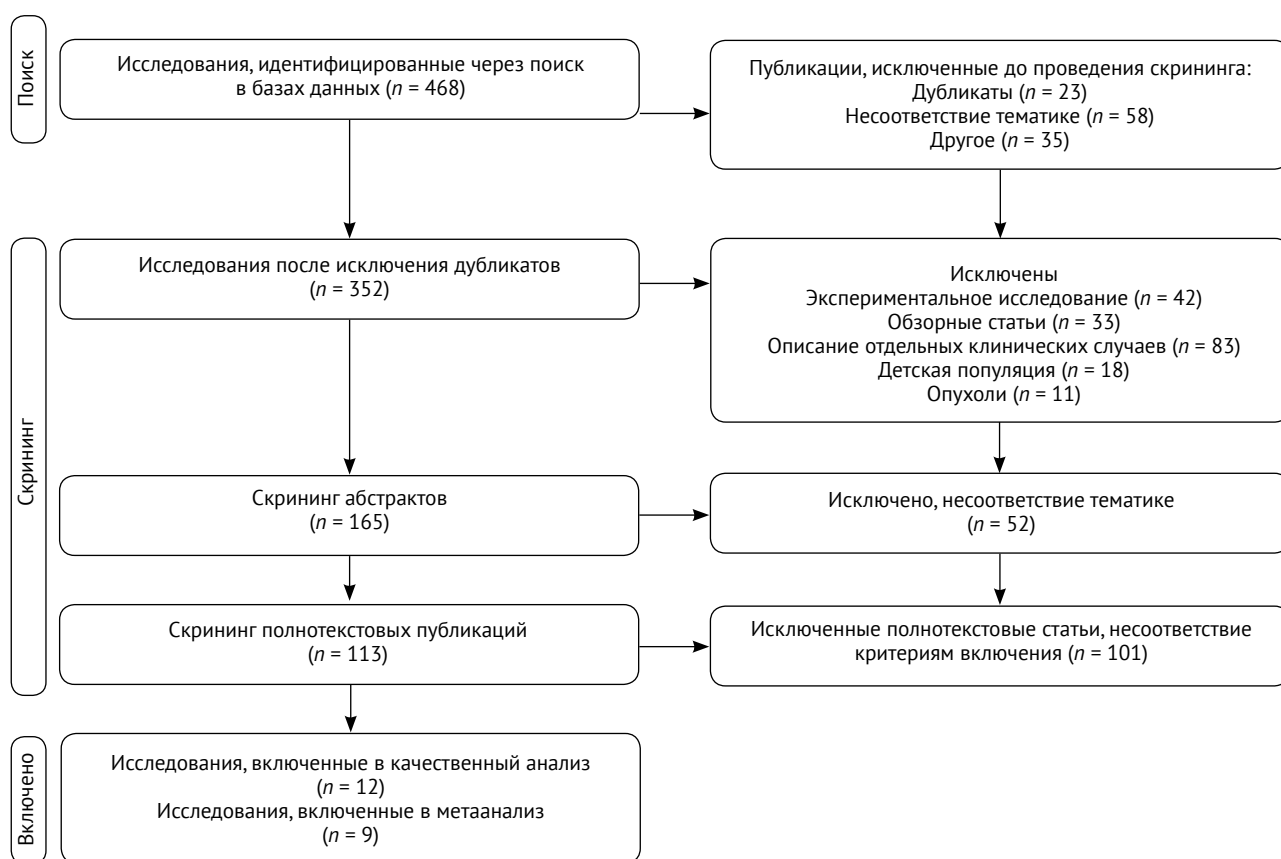


Рисунок 1. Блок-схема поиска и отбора публикаций
Figure 1. Flow diagram of article search and selection

Критерии отбора публикаций в отношении пола участников исследования, варианта фиксации, наличия рандомизации, ослепления или иных аспектов дизайна исследований, кроме вышеуказанных, не устанавливали.

Не включали публикации, соответствовавшие хотя бы одному из критериев:

- 1) материалы конференций, обзорные статьи, клинические рекомендации и метаанализы;
- 2) неполное представление данных в публикации;
- 3) дубликаты исследований с ранее использованными данными;
- 4) наличие обширного дефекта костной ткани после хирургического лечения злокачественного новообразования;
- 5) доклинические исследования на животных и *in vitro*.

Извлечение данных и оценка качества исследования

Скрининг публикаций проведен двумя авторами (А.А.И. и Ф.Ю.А.) независимо друг от друга без применения средств автоматизации. В предварительно созданную таблицу были внесены следующие извлеченные данные: ФИО первого автора, год публикации, тип исследования и уровень доказательности, общие характеристики выборки (количество пациентов, пол, возраст), локализация и протяженность костного дефекта, этиология состояния, выполненное вмешательство, период послеоперационного наблюдения, функциональные исходы, осложнения. При наличии противоречий конфликт интерпретации решался путем коллегиального обсуждения.

Оценка качества исследований с определением риска систематических ошибок проводилась при помощи следующих методологических инструментов: для нерандомизированных исследований — ROBINS-I [12], для рандомизированных контролируемых исследований — RoB 2 [13].

Критерии включения исследований в систематический обзор в соответствии с алгоритмом PICOS

| Параметр | Критерий включения |
|--|---|
| <i>P – Patients (пациенты)</i> | |
| Состояние | Обширный дефект длинной кости конечности (более 2 см) вне зависимости от этиологии и локализации дефекта |
| Возраст | Старше 18 лет |
| <i>I – Intervention (вмешательство)</i> | |
| Вмешательство | Техника Masquelet вне зависимости от варианта фиксации |
| <i>C – Comparison (группа сравнения)</i> | |
| Группы сравнения | Методика костного транспорта по Илизарову ИЛИ методики замещения костных дефектов с применением кровоснабжаемых лоскутов |
| <i>O – Outcome (исходы)</i> | |
| Конечные точки | Срок консолидации Продолжительность фиксации Срок достижения опороспособности конечности Наличие осложнений Необходимость дополнительных/ревизионных вмешательств |
| <i>S – Study type (тип исследования)</i> | |
| Тип исследования | Проспективное либо ретроспективное когортное ИЛИ рандомизированное клиническое |

Статистический анализ

Статистическая обработка данных выполнена с использованием программного обеспечения RevMan 5.4 (Cochrane Collaboration, Дания).

Для описания количественных параметров (продолжительность внешней фиксации, время консолидации) использовали объединенные средние величины с 95% доверительным интервалом (ДИ). Для категориальных показателей (оценка костного сращения, осложнений) применяли отношение шансов (ОШ) с 95% ДИ.

Оценку гетерогенности исследований проводили с помощью Кокрановского Q-теста и I²-теста Хиггинса. Статистически значимой считали гетерогенность при значении $p \leq 0,1$ для Q-теста ввиду низкой мощности теста при малом количестве исследований. Значения I² интерпретировали следующим образом: 0–40% – незначимая, 30–60% – умеренная, 50–90% – существенная, 75–100% – значительная гетерогенность.

При ожидаемой клинической и методологической гетерогенности исследований в метаанализе применяли модель случайных эффектов. При низком уровне гетерогенности использовали модель фиксированных эффектов. Для представления данных использовали лесовидные диаграммы метаанализа.

Для оценки риска публикационного смещения были построены воронкообразные диаграммы и проведены тесты Бегга и Эггера. Учитывая малое количество включенных исследований, результаты этих тестов интерпретировали с осторожностью; наличие асимметрии воронкообразной диаграммы и/или значение $p \leq 0,1$ в тестах Бегга и Эггера рассматривали как возможное свидетельство публикационного смещения ввиду низкой статистической мощности данных методов при малом числе исследований.

Для объединения данных из различных источников медиану и межквартильный размах преобразовывали в среднее значение и стандартное отклонение с использованием методов аппроксимации, предложенных X. Wan с соавторами [14].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты отбора публикаций

Первичный поиск выявил 468 публикаций (см. рис. 1). После удаления дубликатов скрининг проведен среди 352 работ. После изучения абстрактов и определения соответствия статей критериям включения для анализа полнотекстовых вариантов отобраны 9 работ, включенных в метаанализ для оценки эффективности и без-

опасности методик [15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23]. Характеристики работ отражены в таблице 2.

Дополнительно для всесторонней качественной оценки представленных в литературе данных учтены еще три работы [24, 25, 26], представленные в таблице 3.

Таким образом, общее количество включенных в качественный и количественный анализ публикаций составило 12.

Характеристики включенных исследований и оценка их качества

Из 12 включенных в анализ работ 10 (83%) являлись когортными. Также среди отобранных публикаций представлено 2 РКИ (17%) [16, 17].

Отобранные публикации включали данные 375 пациентов, среди которых в 238 (63%) случаях замещение обширного костного дефекта выполнялось при помощи техники Masquelet, в 92 (25%) случаях применен костный транспорт по Илизарову, и в 45 (12%) — свободный кровоснабжаемый малоберцовый лоскут.

В выборке преобладали пациенты мужского пола (305 из 375; 81%). Объединенный средний возраст пациентов составил 40±23 лет в группе Masquelet, 37±11 лет — в группе с кровоснабжаемым лоскутом, 38±25 лет — в группе костного транспорта. Объединенная средняя протяженность дефекта составляла 57±28 мм: от 2 см [15, 18, 25] до 12 см при применении методики остеоиндуктивных мембран [26]) для техники Masquelet, 56±29 мм — в группе с применением костного транспорта по Илизарову, 75±46 мм — в группе с применением свободных кровоснабжаемых малоберцовых лоскутов.

Преобладали описания повреждений длинных костей нижних конечностей ($n = 332$; 87%). Наиболее частой локализацией обширных костных дефектов были повреждения большеберцовой кости ($n = 284$; 74%), на втором месте по частоте — повреждения бедренной кости ($n = 48$; 13%). Среди повреждений верхних конечностей описаны обширные костные дефекты предплечья (лучевая и локтевая кости либо их сочетание; $n = 44$; 12%), плечевой кости ($n = 4$; 1%).

Таблица 2

Исследования для количественного анализа

| Авторы | Год | Тип исследования* | Уровень доказательности | Сравниваемая техника** | Количество пациентов |
|---------------------------|------|-------------------|-------------------------|------------------------|----------------------|
| Sadek A.F. et al. [15] | 2016 | РК | 2с | МКТ | 30 |
| Tong K. et al. [16] | 2017 | РК | 2с | МКТ | 39 |
| Abdou S.A. et al. [17] | 2020 | РК | 2с | МКТ | 14 |
| Gupta G.K. et al. [18] | 2022 | РКИ | 1b | МКТ | 24 |
| Lan C. et al. [19] | 2022 | РК | 2с | СМЛ | 44 |
| Rohilla R. et al. [20] | 2021 | РКИ | 1b | МКТ | 25 |
| Whitlock K.G. et al. [21] | 2025 | РК | 2с | МКТ | 46 |
| Zhang Q. et al. [22] | 2024 | РК | 2с | МКТ | 65 |
| Zhou M. et al. [23] | 2024 | РК | 2с | СМЛ | 43 |

* РКИ — рандомизированное клиническое исследование, РК — ретроспективное когортное.

** МКТ — метод костного транспорта, СМЛ — свободный малоберцовый лоскут.

Таблица 3

Дополнительные исследования для качественного анализа

| Авторы | Год | Тип исследования* | Уровень доказательности | Сравниваемые группы | Количество пациентов |
|-----------------------------|------|-------------------|-------------------------|-------------------------------|----------------------|
| Борзунов Д.Ю. с соавт. [24] | 2022 | ДК | 2с | Наличие / отсутствие инфекции | 24 |
| Liu X. et al. [25] | 2022 | РК | 2с | Вариант фиксации | 23 |
| Zhang Q. et al. [26] | 2023 | РК | 2с | Вариант фиксации | 63 |

* ДК — двунаправленное когортное, РК — ретроспективное когортное.

В 5 из 12 работ (41%) не был четко обозначен период послеоперационного наблюдения. В одной из работ указана продолжительность наблюдения 6 мес. и более [15], еще в одной публикации авторы указывают на продолжительность периода наблюдения более 12 мес. без конкретизации сроков [21]. Максимальная продолжительность периода послеоперационного наблюдения составила более 66 мес. [23].

Оценка публикационного смещения

Для визуальной и статистической оценки риска публикационного смещения были построены воронкообразные диаграммы и проведены тесты Бегга и Эггера для параметра продолжительности фиксации (рис. 2).

При визуальной оценке не выявлено выраженной асимметрии. Статистический анализ также не продемонстрировал весомых свидетельств публикационного смещения (тест Бегга, $p = 1,000$; тест Эггера, $p = 0,230$). Важно отметить, что интерпретация этих тестов ограничена малым количеством включенных исследований, что снижает их статистическую мощность. Таким образом, интерпретация полученных данных требует осторожности.

Оценка риска систематической ошибки

Результаты оценки риска систематических ошибок исследований, включенных в метаанализ, представлены на рисунках 3 и 4.

Таким образом, оценка методологического качества анализируемых клинических исследований, проведенная двумя экспертами, показала высокую потенциальную вероятность систематических смещений при интерпретации результатов метаанализа.

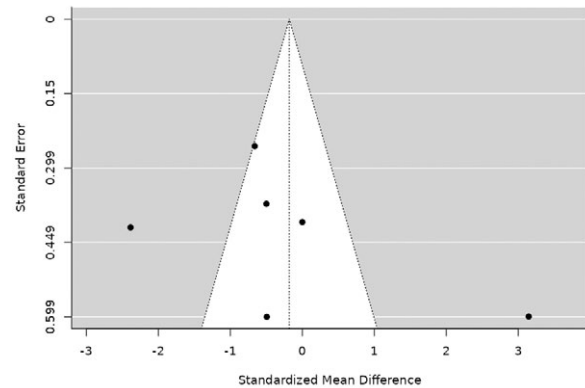


Рисунок 2. Воронкообразная диаграмма для работ с оценкой средней продолжительности фиксации при применении методики Masquelet и костного транспорта

Figure 2. Funnel plot for studies assessing the mean duration of fixation with the Masquelet technique and bone transport

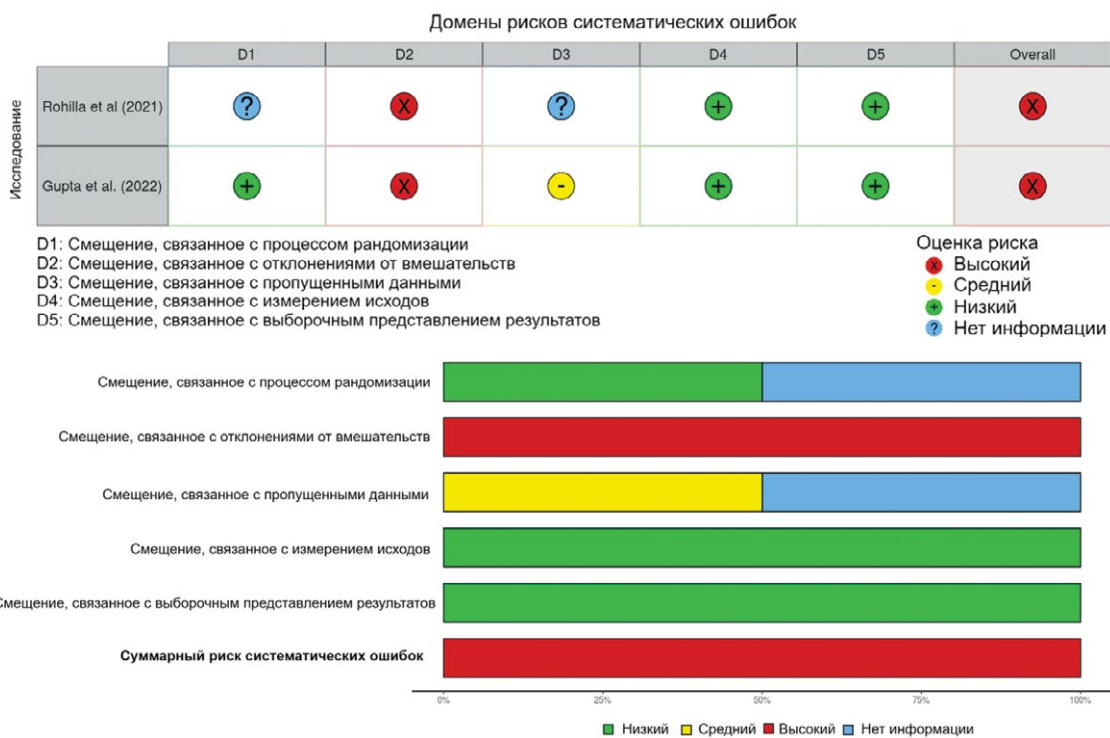


Рисунок 3. Оценка риска систематических ошибок для рандомизированных клинических исследований, включенных в метаанализ (RoB 2 tool)

Figure 3. Risk of bias assessment for randomized controlled trials included in the meta-analysis (RoB 2 tool)

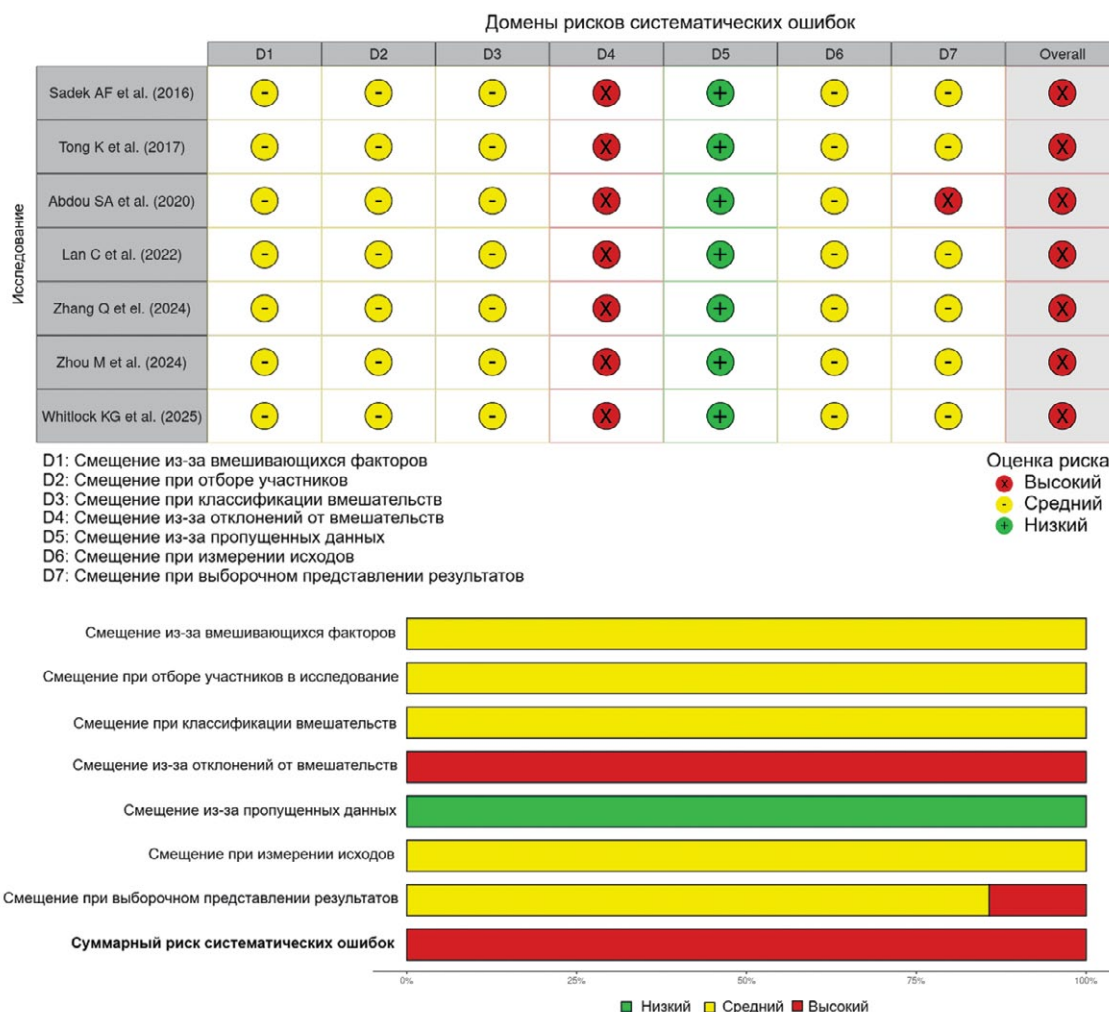


Рисунок 4. Оценка риска систематических ошибок для нерандомизированных клинических исследований, включенных в метаанализ (ROBINS-I tool)

Figure 4. Risk of bias assessment for non-randomized clinical studies included in the meta-analysis (ROBINS-I tool)

Средняя продолжительность фиксации

В случае представления первичных данных продолжительности общей фиксации в сутках [15, 16, 24] выполняли перерасчет показателей в месяцы.

Метаанализ двух подходящих исследований с использованием модели фиксированных эффектов не выявил статистически значимых различий ($p = 0,76$) по общей продолжительности фиксации у пациентов, которым выполняли замещение дефектов костной ткани с помощью техники Masquelet, в сравнении с использованием свободных кровоснабжаемых лоскутов (рис. 5). При этом наблюдалась умеренная, статистически незначимая гетерогенность между исследованиями ($I^2 = 59\%$; $p = 0,12$).

С учетом критически малого количества работ, высокого риска систематической ошибки, низкой чувствительности оценки гетерогенности иссле-

дований интерпретация результатов метаанализа сравнения средней продолжительности фиксации при применении указанных методик требует большой осторожности.

В части работ первичные данные представлены медианой и межквартильным размахом, в связи с чем для проведения метаанализа меры центральной тенденции переведены в среднее значение со стандартным отклонением по методике X. Wan с соавторами с учетом предположения распределения данных, близкому к нормальному [15, 16, 21].

Сравнение результатов метаанализа 6 исследований после аппроксимации данных продемонстрировало аналогичные тенденции в сравнении с предварительным расчетом данных в трех работах, где меры центральной тенденции были представлены средним и стандартным отклонением (рис. 6).

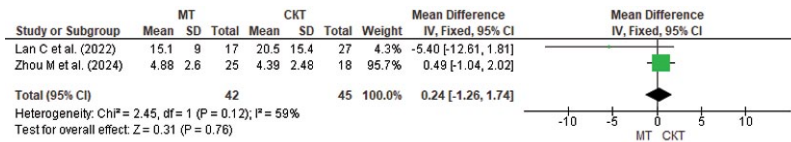


Рисунок 5. Средняя продолжительность фиксации при применении техники Masquelet и свободных кровоснабжаемых лоскутов, мес.

Figure 5. Mean duration of fixation (months) with the Masquelet technique and free vascularized flaps

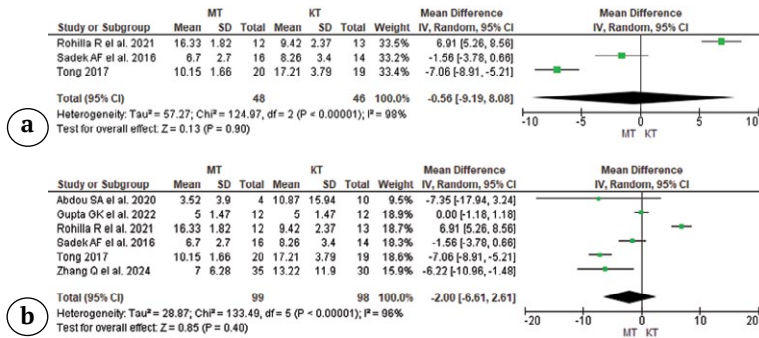


Рисунок 6. Средняя продолжительность фиксации в мес. при применении техник Masquelet и костного транспорта:

a — на основе работ с исходным представлением мер центральной тенденции в качестве среднего и стандартного отклонения;

b — после включения публикаций с преобразованными первичными данными по методу X. Wan с соавт.

Figure 6. Mean duration of fixation (months) with the Masquelet technique and bone transport:

a — based on studies reporting measures of central tendency as mean and standard deviation;

b — after inclusion of publications with primary data converted according to the method of Wan et al.

Таким образом, метаанализ подходящих исследований с использованием модели случайных эффектов не выявил статистически значимых различий по общей продолжительности фиксации у пациентов, которым выполняли замещение дефектов костной ткани с помощью техники Masquelet в сравнении с использованием методики Илизарова ($p = 0,40$). Гетерогенность между исследованиями была высокой ($I^2 = 96\%$; $p < 0,001$).

Ни одно из исследований не оказало чрезмерного влияния на модель, однако исследование R. Rohilla с соавторами было идентифицировано как потенциальный выброс [20].

Доля пациентов с полной консолидацией без дополнительных хирургических вмешательств

Метаанализ подходящих исследований выявил статистически значимую большую долю пациентов, достигших полной консолидации без дополнительных хирургических вмешательств, при

применении костного транспорта в сравнении с методикой Masquelet (32 из 37; 86% против 21 из 34; 61%; $p = 0,02$) (рис. 7). Гетерогенность между исследованиями была низкой ($I^2 = 29\%$, $p = 0,24$).

Конверсия исходного хирургического вмешательства в ампутацию

Доля пациентов, которым выполняли ампутацию конечности, составила 13% (5 из 38) для методики Masquelet и 2% (1 из 47) для костного транспорта. Однако метаанализ трех подходящих исследований не выявил статистически значимых различий в частоте конверсии хирургического вмешательства в ампутацию среди пациентов, которым применяли технику индуцированных мембран в сравнении с методикой Илизарова ($p = 0,09$) (рис. 8). Гетерогенность между исследованиями была низкой ($I^2 = 0\%$; $p = 0,51$).

Аналогичные данные для методики с применением свободных кровоснабжаемых костных лоскутов не были представлены в литературе.

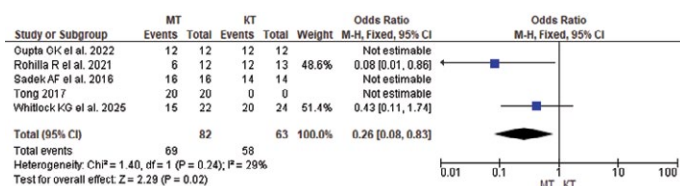


Рисунок 7. Доля пациентов, достигших полной консолидации без дополнительных хирургических вмешательств, при применении техники Masquelet и костного транспорта

Figure 7. Proportion of patients achieving complete bone union without additional surgical interventions with the Masquelet technique and bone transport

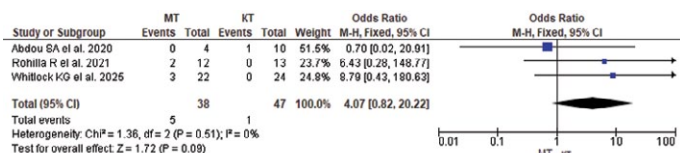


Рисунок 8. Частота конверсии исходного хирургического вмешательства в ампутацию при применении техники Masquelet и костного транспорта

Figure 8. Rate of conversion of the primary surgical procedure to amputation with the Masquelet technique and bone transport

Частота послеоперационных осложнений

Поверхностная ИОХВ

Доля пациентов с поверхностной формой ИОХВ составила 11% (13 из 121) для методики Masquelet и 23% (28 из 122) — для техники костного транспорта. Метаанализ выявил статистически значимо более высокую частоту поверхностных инфекционных осложнений среди пациентов, которым выполняли замещение костного дефекта по методике Илизарова, в сравнении с техникой Masquelet ($p = 0,004$) (рис. 9). Гетерогенность между исследованиями была низкой ($I^2 = 0\%$, $p = 0,82$).

Данные о поверхностных ИОХВ при использовании кровоснабжаемых лоскутов в сравнении с техникой Masquelet не были представлены в публикациях в достаточном для анализа объеме.

Глубокая ИОХВ

Доля пациентов с глубокой ИОХВ составила 15% (18 из 121) для методики Masquelet и 8% (10 из 122) для костного транспорта, выявленные различия были статистически значимыми ($p = 0,04$) (рис. 10). Гетерогенность между исследованиями была низкой ($I^2 = 0\%$; $p = 0,98$).

Доля пациентов с глубокой ИОХВ составила 24% (10 из 42) для методики Masquelet и 42% (19 из 45) для свободных кровоснабжаемых лоскутов, однако различия не были статистически значимыми ($p = 0,35$) (рис. 11). Гетерогенность между исследованиями была умеренной ($I^2 = 49\%$; $p = 0,16$).

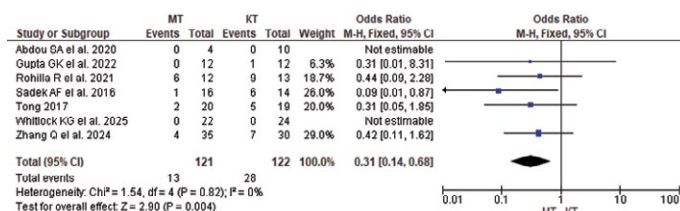


Рисунок 9. Доля поверхностных инфекционных осложнений при применении техник Masquelet и костного транспорта

Figure 9. Proportion of superficial infectious complications with the Masquelet technique and bone transport

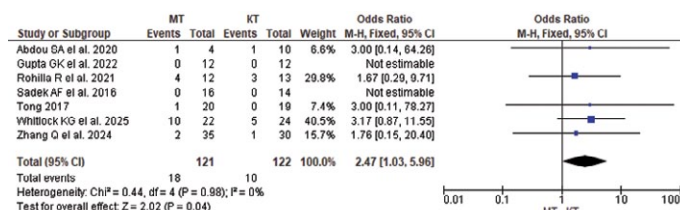


Рисунок 10. Доля глубоких инфекционных осложнений при применении техник Masquelet и костного транспорта

Figure 10. Proportion of deep infectious complications with the Masquelet technique and bone transport

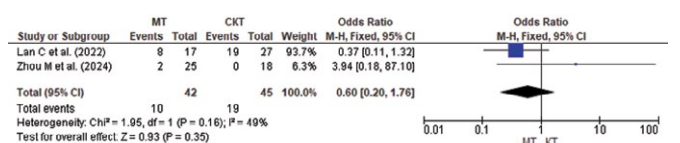


Рисунок 11. Доля глубоких инфекционных осложнений при применении техник Masquelet и свободных кровоснабжаемых лоскутов

Figure 11. Proportion of deep infectious complications with the Masquelet technique and free vascularized flaps

Несращение

Доля пациентов, у которых диагностировали несращение на фоне лечения, составила 11% (13 из 117) для методики Masquelet и 12% (13 из 112) — для костного транспорта по Илизарову ($p = 0,85$) (рис. 12). Гетерогенность между исследованиями была высокой ($I^2 = 74\%$; $p = 0,01$).

Доля пациентов с несращением на фоне лечения составила 7% (3 из 42) для методики Masquelet и 16% (7 из 45) для свободных кровоснабжаемых лоскутов ($p = 0,38$) (рис. 13). Гетерогенность между исследованиями была низкой ($I^2 = 0\%$; $p = 0,81$).

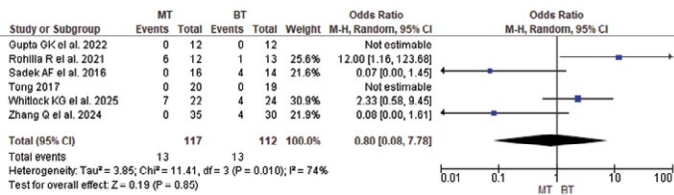


Рисунок 12. Доля несращений при применении техники Masquelet и костного транспорта
Figure 12. Proportion of nonunions with the Masquelet technique and bone transport

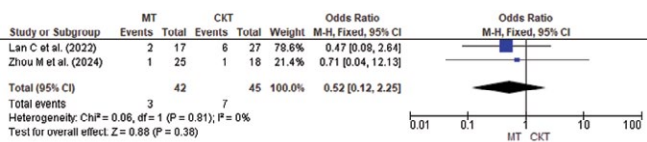


Рисунок 13. Доля несращений при применении техник Masquelet и свободных кровоснабжаемых лоскутов
Figure 13. Proportion of nonunions with the Masquelet technique and free vascularized flaps

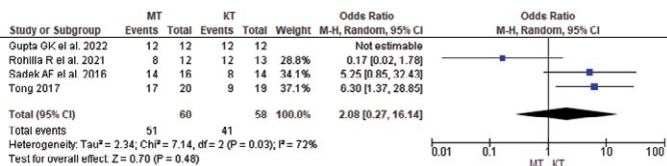


Рисунок 14. Доля отличных и хороших результатов по шкале ASAMI при применении техники Masquelet и костного транспорта
Figure 14. Proportion of excellent and good outcomes according to the ASAMI score with the Masquelet technique and bone transport

Данные о функциональных результатах с применением данной шкалы для оценки исходов лечения пациентов с использованием свободных кровоснабжаемых лоскутов не были представлены в публикациях.

ОБСУЖДЕНИЕ

Современные тенденции, характеризующиеся технологическим прогрессом и параллельным ростом числа локальных вооруженных конфликтов, закономерно приводят к увеличению частоты сложных высокоэнергетических травм, сопровождающихся обширными дефектами длинных костей конечностей. Несмотря на развитие хирургических технологий, сохраняет актуальность проблема выбора оптимального метода реконструкции на фоне снижения качества жизни пациентов с крупными сегментар-

ными дефектами длинных костей конечностей в отдаленном периоде [27]. Обширная отслойка мягких тканей, а также зачастую открытый характер перелома создают условия для высокого риска инфекционных осложнений, что само по себе является серьезным вызовом [28]. С учетом описанных выше особенностей в результате первичной хирургической обработки поврежденного участка кости может сформироваться сегментарный дефект, замещение которого было и остается задачей повышенной сложности [29]. Исторически золотым стандартом лечения данной патологии являлся метод дистракционного остеогенеза по Илизарову [30, 31]. Однако, согласно данным исследования K.G. Whitlock с соавторами, частота только лишь спицевого остеомиелита при замещении таких дефектов может превышать 60%, что вынуждает

врачей-специалистов обращаться к другим методикам [21]. Данное обстоятельство стимулирует поиск и развитие альтернативных хирургических стратегий.

Одним из методов выбора при лечении инфицированных сегментарных дефектов длинных костей является двухэтапная техника, предложенная французским ортопедом Аленом Маскуле (Alain Masquelet) [32]. На первом этапе выполняется радикальная хирургическая обработка области дефекта со стабильной фиксацией костных отломков и заполнением дефекта костным цементом с концентрацией антибактериального препарата до 10 масс.% (1–4 г ванкомицина на 40 г костного цемента) [33]. На втором этапе, спустя 6–8 нед., выполняется удаление цемента с последующей костной пластикой зоны дефекта [34]. Несмотря на более чем 30-летнюю историю применения данной методики, результаты, представленные в литературе, носят противоречивый характер [35]. Однако с учетом высокой контаминации инфекционными агентами области костного дефекта и окружающих его мягких тканей сложно представить что-то более действенное, чем радикальная хирургическая обработка и заполнение дефекта цементным спейсером с антибактериальным препаратом [33]. Так, по результатам исследования E. Liodakis с соавторами, спейсер из полиметилметакрилата с концентрацией антибиотиков до 10 масс.% способствует формированию соединительнотканной мембраны с наилучшими остеоиндуктивными свойствами [36]. В то же время эксперименты *in vitro* демонстрируют недостаточную продолжительность антимикробной активности костного цемента, содержащего 10 масс.% антибиотика [37], которая приводит к низкой эффективности в плане эрадикации возбудителей и может быть причиной большей частоты глубокой ИОХВ в сравнении с костным транспортом по Илизарову, что и было показано в нашем метаанализе. К другим недостаткам методики Masquelet часто относят ее этапность, а также ограничение возможностей применения протяженностью дефекта и его локализацией [38]. С другой стороны, по данным D. Pederiva с соавторами, частота повторных вмешательств в ходе замещения костных дефектов с применением методик костного транспорта и свободной трансплантации комплекса тканей достигает 30%, а частота несращений — 17% [8].

Крайне интересным в свете настоящего исследования видится перспектива применения комбинации методик для замещения дефектов длинных костей конечностей в условиях наличия инфекционного процесса. Так, в работе Д.Ю. Борзунова с соавторами отмечается целе-

сообразность адекватной санации инфекционного очага с имплантацией массивных спейсеров с профилактической дозой антибиотика и последующим замещением дефекта во времени в аппарате Илизарова как возможного варианта лечения данной категории пациентов, включающего в себя преимущества обеих авторских методик [24]. Результаты экспериментальной работы Т.Н. Варсеговой с соавторами свидетельствуют о значимости адекватной фармакотерапии и реабилитации на каждом из этапов замещения дефектов длинных костей конечностей [39]. Данный подход, безусловно, видится перспективным, но требует дальнейших исследований с четко выстроенной методологией.

Ограничения исследования

Данный систематический обзор имеет ряд ограничений, способных влиять на интерпретацию полученных результатов. Существенная клиническая и методологическая гетерогенность включенных исследований, проявляющаяся в различиях дизайна, вариантов фиксации (пластины, интрамедуллярные стержни, аппараты внешней фиксации), послеоперационных протоколов и критериях оценки исходов, ограничивает надежность сводных оценок метаанализа и объясняет высокую статистическую неоднородность. Малое число исследований, особенно для сравнения техники Masquelet со свободными лоскутами, снижает статистическую мощность выводов и не позволяет провести надежный анализ риска публикационного смещения. Основными источниками методологического смещения являются преимущественно ретроспективные когортные исследования с высоким риском смещения отбора, где выбор метода во многом зависел от клинической ситуации, а также отсутствие ослепления в рандомизированных исследованиях. Невозможность стратификации по ключевым клиническим факторам, таким как исходный инфекционный статус и точная протяженность дефекта, из-за неполного представления данных в первичных публикациях не позволяет сформулировать детализированные рекомендации. Дополнительные прогностические переменные (состояние мягких тканей, коморбидность, характеристики костного трансплантата) также не могли быть в полной мере учтены в анализе. Учитывая эти ограничения, результаты следует интерпретировать с осторожностью. Они подтверждают сложность прямого сравнения методов и подчеркивают необходимость проведения крупных проспективных многоцентровых исследований с единым протоколом для минимизации источников систематических ошибок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный систематический обзор подтверждает высокую клиническую эффективность трех основных методов реконструкции обширных сегментарных дефектов длинных костей конечностей — техники Masquelet, костного транспорта по Илизарову и использования свободных кровоснабжаемых лоскутов. Метаанализ не выявил значимого преимущества ни одного метода по ключевым временным параметрам (сроки фиксации и консолидации), однако обнаружил характерные профили безопасности, которые должны учитываться при выборе тактики. Метод Илизарова сопряжен с более высоким риском поверхностных инфекций, а техника Masquelet — с повышенной частотой глубоких инфекционных осложнений, что может отражать недостаточную эффективность антимикробной активности цементных спейсеров у пациентов с инфицированными ранами. В свою очередь, техника Masquelet потен-

циально может быть ассоциирована с лучшей приверженностью лечению и функциональными исходами. Свободные кровоснабжаемые лоскуты продемонстрировали сопоставимую с техникой Masquelet эффективность по основным изучавшимся параметрам.

Таким образом, при выборе метода замещения крупных сегментарных дефектов следует учитывать локализацию и протяженность дефекта, статус мягких тканей, активность инфекционного процесса, а также индивидуальные характеристики пациента, в частности его приверженность лечению и ожидания в отношении качества жизни. Преобладание ретроспективных исследований и их методологическая разнородность ограничивают существующую доказательную базу и определяют необходимость проведения проспективных многоцентровых рандомизированных исследований для разработки более конкретных клинических рекомендаций, включая оценку эффективности проспективных комбинированных методик.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Заявленный вклад авторов

Авдеев А.И. — концепция и дизайн исследования, сбор и интерпретация данных, написание текста статьи и его редактирование.

Федорова Ю.А. — концепция и дизайн исследования, сбор и интерпретация данных.

Малашичева А.Б. — интерпретация данных, редактирование текста рукописи.

Сердюкова Д.А. — интерпретация данных, редактирование текста рукописи.

Докин П.М. — интерпретация данных, редактирование текста рукописи.

Божкова С.А. — написание текста рукописи, научное руководство.

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.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

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

Этическая экспертиза. Не применима.

Информированное согласие на публикацию. Не требуется.

Генеративный искусственный интеллект. При создании статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

DISCLAIMERS

Author contribution

Avdeev A.I. — study concept and design, data acquisition and processing, drafting and editing the manuscript.

Fedorova Yu.A. — study concept and design, data acquisition and processing.

Malashicheva A.B. — data interpretation, editing the manuscript.

Serdiukova D.A. — data interpretation, editing the manuscript.

Docshin P.M. — data interpretation, editing the manuscript.

Bozhkova S.A. — drafting the manuscript, scientific guidance.

All authors have read and approved the final version of the manuscript of the article. All authors agree to bear responsibility for all aspects of the study to ensure proper consideration and resolution of all possible issues related to the correctness and reliability of any part of the work.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Disclosure competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Ethics approval. Not applicable.

Consent for publication. Not required.

Use of artificial intelligence. No generative artificial intelligence technologies were used in the preparation of this manuscript.

ЛИТЕРАТУРА [REFERENCES]

- Habibovic P. Strategic Directions in Osteoinduction and Biomimetics. *Tissue Eng Part A*. 2017;23(23-24):1295-1296. doi: 10.1089/ten.TEA.2017.0430.
- GBD 2019 Fracture Collaborators. Global, regional, and national burden of bone fractures in 204 countries and territories, 1990-2019: a systematic analysis from the Global Burden of Disease Study 2019. *Lancet Healthy Longev*. 2021;2(9):e580-e592. doi: 10.1016/S2666-7568(21)00172-0.
- Solomin L., Komarov A., Semenisty A., Sheridan G.A., Rozbruch S.R. Universal Long Bone Defect Classification. *J Limb Lengthening Reconstr*. 2022;8(1):54-62. doi: 10.4103/jllr.jllr_3_22.
- Nauth A., Hildebrand F., Vallier H., Moore T., Leenen L., Mckinley T. et al. Polytrauma: update on basic science and clinical evidence. *OTA Int*. 2021;4(1):e116. doi: 10.1097/OI9.000000000000116.
- Дятлов В.А., Серёгина Т.С., Беляева А.А., Малашичева А.Б., Ветрилэ М.С., Ванюшенкова А.А. и др. Лечение остеомиелита и переломов с критической потерей костной ткани с использованием биокомпозитов, содержащих нанокорпускулярные полимерные системы внутриклеточной доставки КМБ-кодирующих плазмид, теноксикама и ванкомицина. *Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова*. 2025;32(3):568-584. doi: 10.17816/vto678103.
Dyatlov V.A., Seregina T.S., Belyaeva A.A., Malashicheva A.B., Vetrile M.S., Vaniushenkova A.A. et al. Approach to the treatment of osteomyelitis and fractures with critical bone loss using biocomposites containing nanoparticulate polymeric systems for intracellular delivery of BMP-encoding plasmids, tenoxicam, and vancomycin. *N.N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics*. 2025;32(3):568-584. (In Russian). doi: 10.17816/vto678103.
- Shen Y., Yang Q., Cheng H., Feng Y., Liu Y., Hu J. Evaluation of the comparative efficacy and safety of surgical strategies for long bone defects: a network meta-analysis. *Int J Surg*. 2025;111(4):3030-3039. doi: 10.1097/JS9.0000000000002283.
- Liu K., Shi L., Liu Y., Yusufu A. Ilizarov bone transport versus Masquelet technique for the treatment of bone defects caused by infection: A meta-analysis. *Asian J Surg*. 2023;46(12):6109-6111. doi: 10.1016/j.asjsur.2023.09.087.
- Pederiva D., De Luca L., Faldini C., Vergano L.B. Masquelet's induced membrane technique in the upper limb: a systematic review of the current outcomes. *J Orthop Traumatol*. 2025;26(1):4. doi: 10.1186/s10195-024-00815-w.
- Wakefield S.M., Papakostidis C., Giannoudis V.P., Mandiá-Martínez A., Giannoudis P.V. Distraction osteogenesis versus induced membrane technique for infected tibial non-unions with segmental bone loss: a systematic review of the literature and meta-analysis of available studies. *Eur J Trauma Emerg Surg*. 2024;50(3):705-721. doi: 10.1007/s00068-023-02375-w.
- Liberati A., Altman D.G., Tetzlaff J., Mulrow C., Gøtzsche P.C., Ioannidis J.P. et al. The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: explanation and elaboration. *J Clin Epidemiol*. 2009;62(10):e1-34. doi: 10.1016/j.jclinepi.2009.06.006.
- Methley A.M., Campbell S., Chew-Graham C., McNally R., Cheraghi-Sohi S. PICO, PICOS and SPIDER: a comparison study of specificity and sensitivity in three search tools for qualitative systematic reviews. *BMC Health Serv Res*. 2014;14:579. doi: 10.1186/s12913-014-0579-0.
- Sterne J.A., Hernán M.A., Reeves B.C., Savović J., Berkman N.D., Viswanathan M. et al. ROBINS-I: a tool for assessing risk of bias in non-randomised studies of interventions. *BMJ*. 2016;i4919. doi: 10.1136/bmj.i4919.
- Sterne J.A.C., Savović J., Page M.J., Elbers R.G., Blencowe N.S., Boutron I. et al. RoB 2: a revised tool for assessing risk of bias in randomised trials. *BMJ*. 2019:l4898. doi: 10.1136/bmj.l4898.
- Wan X., Wang W., Liu J., Tong T. Estimating the sample mean and standard deviation from the sample size, median, range and/or interquartile range. *BMC Med Res Methodol*. 2014;14:135. doi: 10.1186/1471-2288-14-135.15.
- Sadek A.F., Laklok M.A., Fouly E.H., Elshafie M. Two stage reconstruction versus bone transport in management of resistant infected tibial diaphyseal nonunion with a gap. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2016;136(9):1233-1241. doi: 10.1007/s00402-016-2523-8.
- Tong K., Zhong Z., Peng Y., Lin C., Cao S., Yang Y. et al. Masquelet technique versus Ilizarov bone transport for reconstruction of lower extremity bone defects following posttraumatic osteomyelitis. *Injury*. 2017;48(7):1616-1622. doi: 10.1016/j.injury.2017.03.042.
- Abdou S.A., Stranix J.T., Daar D.A., Mehta D.D., McLaurin T., Tejwani N. et al. Free Tissue Transfer with Distraction Osteogenesis and Masquelet Technique Is Effective for Limb Salvage in Patients with Gustilo Type IIIB Open Fractures. *Plast Reconstr Surg*. 2020;145(4):1071-1076. doi: 10.1097/PRS.0000000000006696.
- Gupta G.K., Majhee A.K., Rani S., Shekhar S., Prasad P., Chauhan G. A comparative study between bone transport technique using Ilizarov/LRS fixator and induced membrane (Masquelet) technique in management of bone defects in the long bones of lower limb. *J Family Med Prim Care*. 2022;11(7):3660-3666. doi: 10.4103/jfmpc.jfmpc_2447_21.
- Lan C.Y., Lien P.H., Lin Y.T., Lin C.H., Hsu C.C., Lin C.H. et al. Comparison of the clinical outcomes between vascularized bone graft and the Masquelet technique for the reconstruction of Gustilo type III open tibial fractures. *BMC Musculoskelet Disord*. 2022;23(1):1036. doi: 10.1186/s12891-022-06010-4.
- Rohilla R., Sharma P.K., Wadhvani J., Das J., Singh R., Beniwal D. Prospective randomized comparison of bone transport versus Masquelet technique in infected gap nonunion of tibia. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2022;142(8):1923-1932. doi: 10.1007/s00402-021-03935-8.
- Whitlock K.G., Brodke D.J., Khoury P.H., Li V., Bell A., Okhueiregbe D. et al. Ring Fixator Bone Transport Is Associated With Fewer Unplanned Major Reoperations Than Masquelet in the Treatment of Segmental Bone Defects of the Tibia. *J Orthop Trauma*. 2025;39(4):161-166. doi: 10.1097/BOT.0000000000002953.
- Zhang Q., Kang Y., Wu Y., Ma Y., Jia X., Zhang M. et al. Masquelet combined with free-flap technique versus the Ilizarov bone transport technique for severe composite tibial and soft-tissue defects. *Injury*. 2024;55(6):111521. doi: 10.1016/j.injury.2024.111521.

23. Zhou M., Ma Y., Jia X., Wu Y., Liu J., Wang Y. et al. Comparison of free vascularized fibular grafts and the Masquelet technique for the treatment of segmental bone defects with open forearm fractures: a retrospective cohort study. *J Orthop Traumatol.* 2024;25(1):44. doi: 10.1186/s10195-024-00787-x.
24. Борзунов Д.Ю., Моховиков Д.С., Колчин С.Н., Люлин С.В., Кутепов С.М., Гильманов Р.Т. Проблемы и успехи комбинированного применения технологий Илизарова и Masquelet. *Генный ортопедии.* 2022;28(5):652-658. doi: 10.18019/1028-4427-2022-28-5-652-658. Borzunov D.Yu., Mokhovikov D.S., Kolchin S.N., Lyulin S.V., Kutepov S.M., Gilmanov R.T. Problems and successes in the combined application of the Ilizarov and Masquelet technologies. *Genij Ortopedii.* 2022;28:652-658. (In Russian). doi: 10.18019/1028-4427-2022-28-5-652-658.
25. Liu X., Min H.S., Chai Y., Yu X., Wen G. Masquelet technique with radical debridement and alternative fixation in treatment of infected bone nonunion. *Front Surg.* 2022;9:1000340. doi: 10.3389/fsurg.2022.1000340.
26. Zhang H., Zhao X., Yang X., Zhang X., Chen X., Zhou T. et al. Comparison of internal and external fixation after debridement in the Masquelet technique for Cierny-Mader type IV tibial post-traumatic osteomyelitis. *Injury.* 2023;54(2):422-428. doi: 10.1016/j.injury.2022.11.030
27. Giannoudis P.V., Harwood P.J., Kontakis G., Allami M., Macdonald D., Kay S.P. et al. Long-term quality of life in trauma patients following the full spectrum of tibial injury (fasciotomy, closed fracture, grade IIIB/IIIC open fracture and amputation). *Injury.* 2009;40(2):213-9. doi: 10.1016/j.injury.2008.05.024.
28. Moriarty T.F., Metsemakers W.J., Morgenstern M., Hofstee M.I., Vallejo Diaz A., Cassat J.E. et al. Fracture-related infection. *Nat Rev Dis Primer.* 2022;8:67. doi: 10.1038/s41572-022-00396-0.
29. Karger C., Kishi T., Schneider L., Fitoussi F., Masquelet A.C. Treatment of posttraumatic bone defects by the induced membrane technique. *Orthop Traumatol Surg Res.* 2012;98:97-102. doi: 10.1016/j.otsr.2011.11.001.
30. Aktuglu K., Erol K., Vahabi A. Ilizarov bone transport and treatment of critical-sized tibial bone defects: a narrative review. *J Orthop Traumatol.* 2019;20(1):22. doi: 10.1186/s10195-019-0527-1.
31. Xie L., Huang Y., Zhang L., Si S., Yu Y. Ilizarov method and its combined methods in the treatment of long bone defects of the lower extremity: systematic review and meta-analysis. *BMC Musculoskelet Disord.* 2023;24(1):891. doi: 10.1186/s12891-023-07001-9.
32. Masquelet A.C., Fitoussi F., Begue T., Muller G.P. Reconstruction of the long bones by the induced membrane and spongy autograft. *Ann Chir Plast Esthet.* 2000;45(3):346-353. (In French).
33. Xie J., Wang W., Fan X., Li H., Wang H., Liao R. et al. Masquelet technique: Effects of vancomycin concentration on quality of the induced membrane. *Injury.* 2022;53(3):868-877. doi: 10.1016/j.injury.2021.11.003.
34. Masquelet A.C. Induced Membrane Technique: Pearls and Pitfalls. *J Orthop Trauma.* 2017;31 Suppl 5:S36-S38. doi: 10.1097/BOT.0000000000000979..
35. Morris R., Hossain M., Evans A., Pallister I. Induced membrane technique for treating tibial defects gives mixed results. *Bone Joint J.* 2017;99-B(5):680-685. doi: 10.1302/0301-620X.99B5.BJJ-2016-0694.R2.
36. Lioudakis E., Giannoudis V.P., Sehmisch S., Jha A., Giannoudis P.V. Bone defect treatment: does the type and properties of the spacer affect the induction of Masquelet membrane? Evidence today. *Eur J Trauma Emerg Surg.* 2022;48(6):4403-4424. doi: 10.1007/s00068-022-02005-x.
37. Божкова С.А., Гаджимогомедов М.Ш., Гордина Е.М., Антипов А.П., Ваганов Г.В., Юдин В.Е. Экспериментальное обоснование комбинаций антимикробных препаратов для импрегнации костного цемента. *Травматология и ортопедия России.* 2025;31(1):76-84. doi: 10.17816/2311-2905-17665. Bozhkova S.A., Gadzhimagomedov M.Sh., Gordina E.M., Antipov A.P., Vaganov G.V., Yudin V.E. Experimental Validation of Antimicrobial Drug Combinations for Bone Cement Impregnation. *Traumatology and Orthopedics of Russia.* 2025;31(1):76-84. (In Russian). doi: 10.17816/2311-2905-17665.
38. Morelli I., Drago L., George D.A., Gallazzi E., Scarponi S., Romano C.L. Masquelet technique: myth or reality? A systematic review and meta-analysis. *Injury.* 2016;47 Suppl 6:S68-S76. doi: 10.1016/S0020-1383(16)30842-7.
39. Варсегова Т.Н., Дюрягина О.В., Еманов А.А., Моховиков Д.С., Борзунов Д.Ю. Морфологические изменения большеберцового нерва при замещении крупных дефектов большеберцовой кости аппаратом Илизарова в комбинации с методом Masquelet: экспериментальное исследование. *Травматология и ортопедия России.* 2020;26(4):93-101. doi: 10.21823/2311-2905-2020-26-4-93-101. Varsegova T.N., Diuriagina O.V., Emanov A.A., Mokhovikov D.S., Borzunov D.Yu. Morphological Changes in the Tibial Nerve During the Treatment of Large Tibia Defects Using Ilizarov Apparatus Combining with the Masquelet Technique: Experimental Study. *Traumatology and Orthopedics of Russia.* 2020;26(4):93-101. (In Russian). doi: 10.21823/2311-2905-2020-26-4-93-101.

Сведения об авторах

✉ Авдеев Александр Игоревич — канд. мед. наук
 Адрес: Россия, 195427, г. Санкт-Петербург,
 ул. Академика Байкова, д. 8
<https://orcid.org/0000-0002-1557-1899>
 eLibrary SPIN: 2799-2563
 e-mail: spaceship1961@gmail.com

Федорова Юлия Андреевна — канд. мед. наук
<https://orcid.org/0000-0003-3842-2113>
 eLibrary SPIN: 3911-4108
 e-mail: julsigareva@gmail.com

Authors' information

✉ Alexandr I. Avdeev — Cand. Sci. (Med.)
 Address: 8, Akademika Baykova st., St. Petersburg,
 195427, Russia
<https://orcid.org/0000-0002-1557-1899>
 eLibrary SPIN: 2799-2563
 e-mail: spaceship1961@gmail.com

Yulia A. Fedorova — Cand. Sci. (Med.)
<https://orcid.org/0000-0003-3842-2113>
 eLibrary SPIN: 3911-4108
 e-mail: julsigareva@gmail.com

Малашичева Анна Борисовна — д-р биол. наук

<https://orcid.org/0000-0002-0820-2913>

eLibrary SPIN: 6053-2075

e-mail: malashicheva@incras.ru

Сердюкова Дарья Александровна

<https://orcid.org/0000-0002-5056-3368>

eLibrary SPIN: 8040-6969

e-mail: dasha_perepletch@mail.ru

Докин Павел Михайлович

<https://orcid.org/0000-0002-0182-009X>

eLibrary SPIN: 9896-3742

e-mail: pdocshin@icloud.com

Божкова Светлана Анатольевна — д-р мед. наук,
профессор

<http://orcid.org/0000-0002-2083-2424>

eLibrary SPIN: 3086-3694

e-mail: clinpharm-rniito@yandex.ru

Anna B. Malashicheva — Dr. Sci. (Biol.)

<https://orcid.org/0000-0002-0820-2913>

eLibrary SPIN: 6053-2075

e-mail: malashicheva@incras.ru

Daria A. Serdiukova

<https://orcid.org/0000-0002-5056-3368>

eLibrary SPIN: 8040-6969

e-mail: dasha_perepletch@mail.ru

Pavel M. Docshin

<https://orcid.org/0000-0002-0182-009X>

eLibrary SPIN: 9896-3742

e-mail: pdocshin@icloud.com

Svetlana A. Bozhkova — Dr. Sci. (Med.), Professor

<http://orcid.org/0000-0002-2083-2424>

eLibrary SPIN: 3086-3694

e-mail: clinpharm-rniito@yandex.ru