

ОРИГИНАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ



УДК 617.3

© Лычагин А.В., Грицюк А.А., Елизаров М.П., Сметанин С.М., Минасов Б.Ш., Минасов Т.Б., Якупова Е.Р., Глазунов С.Ю., Кабиров Р.Д., Саубанов Р.А., Гавловский М.Я., 2026

Оригинальное исследование / Original research

ГИСТОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РЕЗЕЦИРОВАННОЙ КОСТНОЙ ТКАНИ ПОСЛЕ ТОТАЛЬНОЙ АРТРОПЛАСТИКИ КОЛЕННОГО СУСТАВА: СРЕДНЕСРОЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

А.В. ЛЫЧАГИН¹, А.А. ГРИЦЮК¹, М.П. ЕЛИЗАРОВ¹, С.М. СМЕТАНИН¹, Б.Ш. МИНАСОВ², Т.Б. МИНАСОВ², Е.Р. ЯКУПОВА², С.Ю. ГЛАЗУНОВ², Р.Д. КАБИРОВ², Р.А. САУБАНОВ², М.Я. ГАВЛОВСКИЙ¹

¹ ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), 119991, Москва, Россия

² ФГАОУ ВО Башкирский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации, 450008, Уфа, Республика Башкортостан, Россия

Аннотация

Точность позиционирования компонентов при роботическом тотальном эндопротезировании коленного сустава (РоТЭКС) не вызывает сомнений. Сравнение РоТЭКС и мануальное ТЭКС с результатами гистологического исследования костей, после резекции разными режущими инструментами, является актуальным.

Цель: изучить гистологические особенности резекции кости фрезой робота и осциллирующей пилой и их влияние на клинические среднесрочные результаты после тотального эндопротезирования коленного сустава.

Материалы и методы. Проведено сравнительное проспективное двухцентровое исследование с 2022 по 2025 гг. Средний возраст: группа 1 (РоТЭКС) – 66,4±8,3 лет, группа 2 (ТЭКС) – 66,59±8,6. Медиана ИМТ: группа 1 – 30,28 (Q1 – 26,65; Q3 – 34,21) кг/м², группа 2 – 33,91 (32,23; 36,93) кг/м². Угол НКА: группа 1 – 171° (170; 172)°; группа 2 – 170° (170; 173)°. Динамика состояния пациентов оценивалась по ВАШ, WOMAC. Гистологическим методом оценивали микроархитектонику костной ткани.

Результаты. В группе РоТЭКС в раннем послеоперационном периоде по скованности результаты лучше, а на протяжении 1–3 лет статистическая значимость по функции имеет разницу в медианах 1–2 балла. При анализе гистологической картины совокупность морфологических изменений костной ткани (микропереломы, дефекты, некроз) после РоТЭКС в 4,97 раза меньше, чем при традиционной технике.

Вывод. Гистологически РоТЭКС характеризуется меньшей степенью повреждения и меньшей шероховатостью поверхности костной ткани в 4,97 раза ($p<0,05$), чем при традиционном эндопротезировании коленного сустава, что не влияет на клинические трехлетние результаты.

Ключевые слова: роботизированное тотальное эндопротезирование коленного сустава, гистологическое исследование кости.

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

Источник финансирования. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Лычагин А.В., Грицюк А.А., Елизаров М.П., Сметанин С.М., Минасов Б.Ш., Минасов Т.Б., Якупова Е.Р., Глазунов С.Ю., Кабиров Р.Д., Саубанов Р.А., Гавловский М.Я. Гистологические особенности резецированной костной ткани после тотальной артропластики коленного сустава: среднесрочные результаты. *Кафедра травматологии и ортопедии*. 2026; 1: 7–21.

Этическая экспертиза. Пациенты подписали добровольное информированное согласие на участие в исследовании и дали согласие на обработку и публикацию клинического материала. Исследование одобрено этическим комитетом.

HISTOLOGICAL FEATURES OF RESECTED BONE TISSUE AFTER TOTAL KNEE ARTHROPLASTY: MID-TERM OUTCOMES

ALEXEY V. LYCHAGIN¹, ANDREY A. GRITSYUK¹, MIKHAIL P. ELIZAROV¹, SERGEY M. SMETANIN¹, BULAT SH. MINASOV², TIMUR B. MINASOV², EKATERINA R. YAKUPOVA², STANISLAV Y. GLAZUNOV², RAHIMBAJ D. KABIROV², RADMIR A. SAUBANOV², MAXIM YA. GAVLOVSKY¹

¹ Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russia (Sechenov University), 119991, Moscow, Russia

² Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Medical University» of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, 450008, Ufa, Russia

Abstract

Background: The accuracy of component positioning in robotic-assisted total knee arthroplasty (RaTKA) is unquestionable. Comparing RaTKA with conventional total knee arthroplasty (TKA), including histological examination of bone tissue following resection using different cutting instruments, remains clinically relevant.

Objective: To investigate the histological features of bone resection performed with a robotic burr versus an oscillating saw and their impact on mid-term clinical outcomes after total knee arthroplasty.

Materials and Methods. A comparative prospective two-center study was conducted from 2022 to 2025. Mean age: Group 1 (RaTKA) – 66,4 ± 8,3 years; Group 2 (TKA) – 66,59 ± 8,6 years. Median BMI: Group 1 – 30,28 (Q1 26,65; Q3 34,21) kg/m²; Group 2 – 33,91 (32,23; 36,93) kg/m². Hip-knee-ankle (HKA) angle: Group 1 – 171° (170°; 172°); Group 2 – 170° (170°; 173°). Patient outcomes were assessed using Visual Analog Scale (VAS) and WOMAC scores. Bone tissue microarchitecture was evaluated histologically.

Results. In the RTKA group, early postoperative stiffness outcomes were superior. Over 1–3 years, functional scores demonstrated a statistically significant difference, with median values differing by 1–2 points. Histological analysis revealed that the extent of morphological bone tissue changes (microfractures, defects, necrosis) was 4,97-fold lower following RTKA compared to the conventional technique.

Conclusion. Histologically, RaTKA is characterized by a 4,97-fold reduction in bone tissue damage and bone surface roughness ($p < 0,05$) relative to conventional TKA, without affecting three-year clinical outcomes.

Key words: robotic total knee arthroplasty, bone histology

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Funding: the study had no sponsorship

For citation: Lychagin A.V., Gritsyuk A.A., Elizarov M.P., Smetanin S.M., Minasov B.Sh., Minasov T.B., Yakupova E.R., Glazunov S.Yu., Kabirov R.D., Saubanov R.A., Gavlovsky M.Ya. Histological Features of Resected Bone Tissue after Total Knee Arthroplasty: Mid-term Outcomes. *Department of Traumatology and Orthopedics*. 2026; 1: 7–21.

DOI: 10/17238/issn2226-2016.2026.1.7-21

Введение

Точность позиционирования компонентов при использовании роботических установок во время тотального эндопротезирования коленного сустава (ТЭКС) не вызывает сомнений [1–5]. Исследования по сравнению двух методик роботизированного и мануального ТЭКС продолжаются, исследуются: восстановление функции оперированного сустава, рентгенологическую картину, выживаемость эндопротеза [5, 6]. По литературным данным в краткосрочных, в течение 1–2 лет, наблюдениях пациенты достигают лучших функциональных результатов после роботизированного эндопротезирования [7, 8, 9], однако в других источниках разницы между методиками нет [10, 11].

Асептическое расшатывание компонентов эндопротеза, которое возникает в 31–34 % случаев, может стать причиной ревизионных операций [12, 13, 14]. Одна из теорий развития такого осложнения является образование избыточных частиц износа полиэтилена, которое вызывает воспаление и приводит к усиленной работе остеокластов и макрофагов, что приводит к локальному остеолиту [14, 15]. При использовании осцилляторной пилы для резекции кости, поверхность может казаться плоской, но на микроскопиче-

ском уровне выявляются костные неровности, тем самым эффективный контакт между большеберцовым компонентом и костью может составлять 79,4%±0,3% поверхности [16]. Немало важным фактором является точность ручного опиления, которая во фронтальной плоскости (варус-вальгус) может составлять от ±1,5° до ±2,0°, а в сагиттальной (сгибание-разгибание) быть в диапазоне от ±3,0° до ±4,0° [17]. После роботической резекции кости, средняя шероховатость костной поверхности бедра 0,16±0,06 мм, и зазор между костью и имплантатом в среднем находился в пределах 0,4 мм для 97,9% поверхности [18].

Основываясь на литературные данные, авторы определили высокую актуальность изучения влияния гистологической картины кости после резекции роботизированной фрезой и ручной осцилляторной пилой на среднесрочные клинические результаты.

Цель: изучить гистологические особенности резекции кости фрезой робота и осциллирующей пилой и их влияние на клинические среднесрочные результаты после тотального эндопротезирования коленного сустава.

Методы исследования

Проведено сравнительное проспективное двуцентровое исследование в параллельных группах с 2022 по 2025 гг. в клинике травматологии, ортопедии и патологии суставов университетской клинической больницы № 1 кафедры травматологии, ортопедии и хирургии катастроф ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет) г. Москва и в клинике кафедры травматологии и ортопедии ФГБОУ ВО БГМУ Минздрава России г. Уфа.

Критерии включения пациентов в исследование:

- возраст пациентов старше 18 лет с диагнозом – гонартроз 3–4 ст. по классификации Kellgren-Lawrence;
- наличие письменного информированного согласия на участие в исследовании и на выполнение операции ТЭКС по предложенной методике.

Критерии невключения пациентов в исследование:

- риск анестезиологического пособия по шкале ASA более III;
- индекс массы тела (ИМТ) больше 45 кг/м²;
- варусная деформация коленного сустава >15°;
- вальгусная деформация;
- разгибательная контрактура коленного сустава до 100°.

Критерии исключения:

- отказ пациента от дальнейшего участия в исследовании;
- невозможность пациента явиться на контрольные осмотры;
- несоблюдение пациентом предписанного режима.

Исследование одобрено локальным этическим комитетом Сеченовского университета (протокол от 08.12.22 № 25–22) и зарегистрировано на ClinicalTrials.gov (ID: NCT05712291). Информированное согласие пациентов на участие в исследовании получено до включения в исследование.

В исследовании изучали уровень болевого синдрома пациентов по визуально-аналоговой шкале (ВАШ), показатели по шкале опроснику WOMAC. По результатам телерентгенограммы нижних конечностей изучали степень деформации коленного сустава во фронтальной плоскости (угол НКА – Hip-Knee-Ankle), расчет которого производили в программе RadiAnt DICOM Viewer. Полученные значения заносили в базу данных. Статистическую обработку клинического материала проводили с помощью программы IBM SPSS Statistics 23 (SPSS Inc., Чикаго, Иллинойс).

Для клинического исследования отобрано методом сплошной выборки 234 пациента (153 пациента прооперированы в г. Москве и 81 пациент – в г. Уфе), из которых 27 пациентов не включены и 7 пациентов – исключены из исследования. В анализ исследования вошло 200 пациентов и сформированы 2 равные группы: группа 1 – пациенты, которым выполнено роботизированное тотальное эндопротезирование коленного сустава (РоТЭКС) с применением

автономной роботической установки Cuvis Joint; группа 2 – пациенты, которым выполнено ТЭКС мануальной техникой. Анестезиологическое пособие у всех пациентов было одинаковым – спинальная анестезия с внутривенной седацией. Для выполнения хирургического маневра осуществлялся медиальный парapatellarный доступ с вывихом надколенника кнаружи, который в группах не отличался. Пневматурникет не применялся. Имплантировались эндопротезы коленного сустава цементной фиксации фирмы Zimmer® NexGen с сохранением задней крестообразной связки (Cruciate Retaining – CR) с фиксированным вкладышем, без замены суставной поверхности надколенника. Пациентам обеих групп применена концепция механического выравнивания оси нижней конечности. Распределение пациентов в группах по полу проиллюстрировано на рисунке 1.

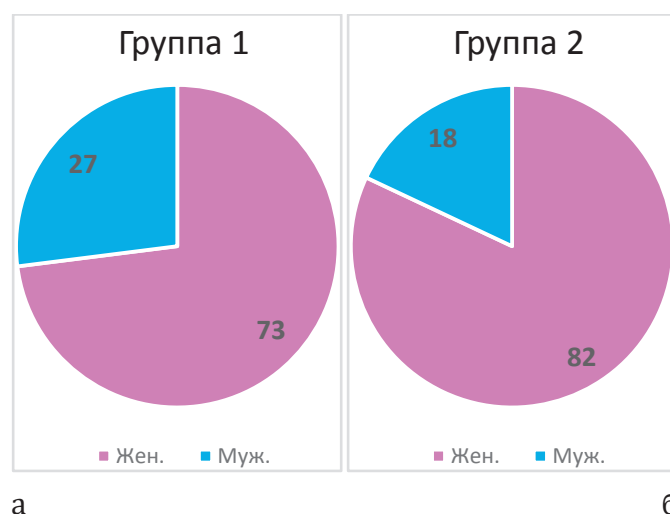


Рисунок 1. Распределение пациентов по полу в группах:
а - РоТЭКС; б - ТЭКС

Средний возраст в группе 1 составил 66,4±8,3 лет, в группе 2 – 66,59±8,6 лет, распределение нормальное. Медиана ИМТ в группе 1 составила 30,28 с межквартильным размахом (Q1 – 26,65; Q3 – 34,21) кг/м², в группе 2 – 33,91 (32,23; 36,93) кг/м². Угол НКА в группах был следующий: группа 1 – 171° (170; 172)°; группа 2 – 170° (170; 173)° (рисунок 2). Распределение показателей ИМТ и угла НКА отличается от нормального.

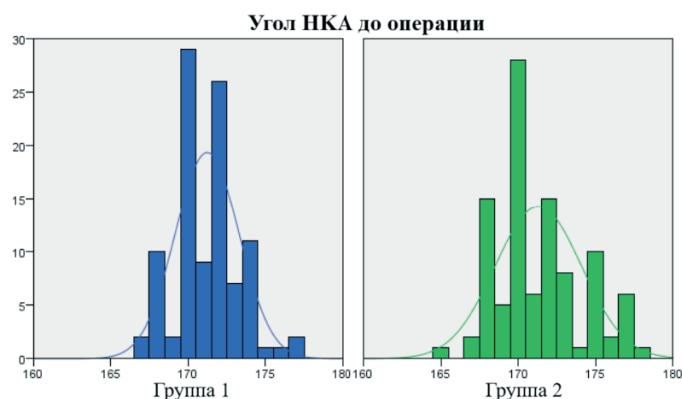


Рисунок 2. Распределение пациентов по углу НКА до операции

Уровень болевого синдрома по ВАШ в группе 1 – 70 (60; 80) баллов, в группе 2 – 70 (70; 80) баллов. По субшкале “Боль” WOMAC в группе 1 показатель составил 17 (16; 18) баллов, в группе 2 – 17 (16; 18) баллов. Субшкала “Скованность” WOMAC в группе 1 – 7 (7; 8) баллов, в группе 2 – 7 (7; 8) баллов. Значение по субшкале “Степень затруднения функции (СЗФ)” WOMAC в группе 1 – 58 (55; 62) баллов, в группе 2 – 62 (58; 64) баллов. Распределение по шкалам также отличается от нормального. Распределение пациентов в группах и сравнение показателей между группами представлены в таблице 1.

Таблица 1

Антропометрические показатели до операции

Показатель	Группа 1		Группа 2		Сравнение
	Значение	p*	Значение	p*	p**
Возраст (лет)	66,4±8,3	=0,2	66,59±8,6	=0,2	=0,865
ИМТ (кг/м ²)	30,28 (26,65; 34,21)	=0,2	33,91 (32,23; 36,93)	=0,048	<0,05
Угол НКА (°)	171 (170; 172)	<0,05	170 (170; 173)	<0,05	=0,666
ВАШ (балл)	70 (60; 80)	<0,05	70 (70; 80)	<0,05	=0,182
WOMAC (балл)	Боль 17 (16; 18)	<0,05	17 (16; 18)	<0,05	<0,05
	Скованность 7 (7; 8)	<0,05	7 (7; 8)	<0,05	<0,05
	СЗФ 58 (55,25; 62)	<0,05	62 (58; 64)	<0,05	<0,05

Примечание: * - критерий Колмогорова-Смирнова; ** - критерий Манна-Уитни

Во время операции у пациентов в обеих группах, при дистальной резекции медиального мыщелка бедра, взяты кусочки костей для выполнения морфологического анализа 67 гистологических препаратов, из которых 32 после традиционного эндопротезирования с применением осцилляторной пилы с толщиной лезвия 1,25 мм и 35 после РоТЭКС при помощи цилиндрической фрезы диаметром 6,2 мм с ирригацией физиологическим раствором (рисунок 3). Во время мануальной ТЭКС 2 препарата были испорчены. Операции в Первом МГМУ им. И. М. Сеченова выполняли 3 хирурга, в БГМУ – 2 хирурга. Гистологические препараты костной ткани оценивал специалист гистолог-морфолог г. Уфы, который не знал из какой группы пациент.



а



б

Рисунок 3. Интраоперационный вид костей после: а - роботического опиления; б - ручного опиления

Образцы фиксировались в 10% нейтральном формалине при комнатной температуре в течение 24–48 часов, что обеспечивало сохранность тканевой архитектуры,

клеточных элементов и межклеточного матрикса (рисунок 4). После фиксации костные фрагменты подвергали декальцинации в растворе этилендиаминтетрауксусной кислоты (ЭДТА) до достижения оптимальной плотности, пригодной для микротомии.

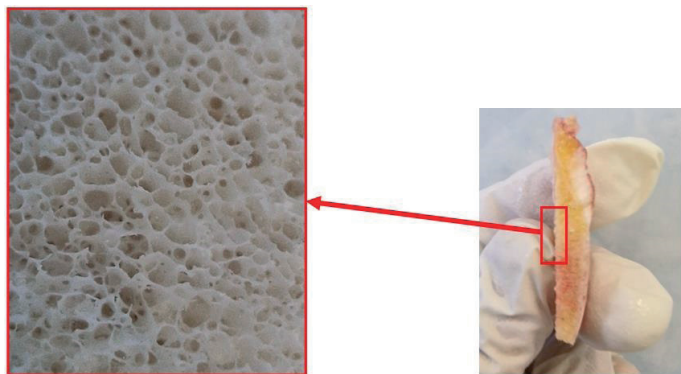


Рисунок 4. Костная ткань после роботической резекции медиального мыщелка бедренной кости: а - микрофото, увеличение x20; б - общий вид препарата

После завершения декальцинации материал подвергался гистологической проводке через возрастающие концентрации этанола для дегидратации, затем осуществлялось просветление в ксилоле с последующей заливкой в парафиновые блоки. Из парафиновых блоков изготавливались серийные гистологические срезы толщиной 3–5 мкм с использованием ротационного микротом, с последующим монтажом срезов на предметные стёкла. Для обзорной оценки морфологии костной ткани срезы окрашивались гематоксилином и эозином по стандартной методике: гематоксисин применяли для визуализации ядерных структур, эозин – для оценки цитоплазмы и костного матрикса.

Микроскопическое исследование проводили с использованием светового микроскопа при различных увеличениях. В ходе анализа оценивали сохранность микроархитектоники костной ткани, состояние трабекулярной и кортикальной кости, выраженность механической травматизации в виде микротрещин и микропереломов, жизнеспособность остеоцитов, наличие и протяжённость зон остеонекроза, а также изменения в костномозговых пространствах, включая воспалительную инфильтрацию и сосудистые реакции. Количественную оценку выявленных морфологических изменений выполняли методом морфометрии на цифровых микрофотографиях с использованием специализированного программного обеспечения, с последующим статистическим анализом результатов. Для статистического анализа использовали U-критерий Манна-Уитни с расчётом уровня значимости различий между группами. Статистически значимыми различия считали достоверными при $p < 0,05$.

Результаты

Сравнение пациентов в группах, у которых проводился гистологический анализ ($n=35$ в группе 1; $n=32$ в группе 2) с пациентами, которым данный анализ не проводился ($n=65$ в группе 1; $n=68$ в группе 2) не выявил значимых различий по возрасту, ИМТ, углу НКА, шкале WOMAC ($p > 0,05$), что позволило экстраполировать данные на всю выборку. Гистологическая оценка костной ткани выявила выраженные различия в характере и степени повреждений между исследуемыми группами. Макро- и микроскопически изменения локализовались в зоне хирургического воздействия и включали дефект костного матрикса, участки микропереломов и очаги термического воздействия, формируя суммарную зону альтерации различной протяжённости.

В образцах 1-й группы поверхность резекции была более ровной и однородной, с минимальными признаками макроскопического повреждения (рисунок 5). Линии резекции образцов 2-й группы характеризовались неровным рельефом с признаками механической травматизации костной поверхности. Отмечались участки уплотнения и локальной деформации костной ткани, что соответствовало зоне первичного дефекта (рисунок 6).

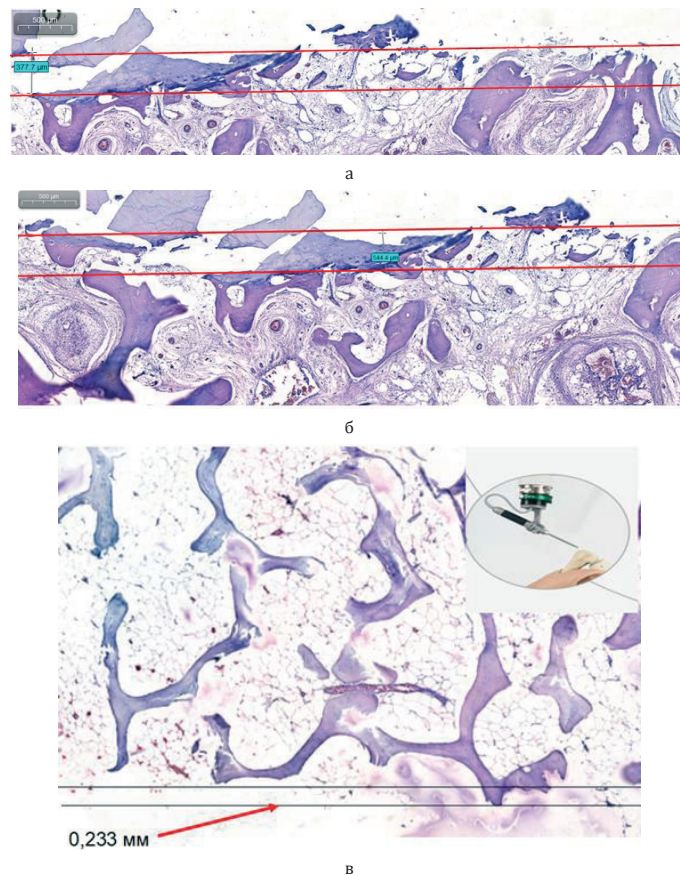
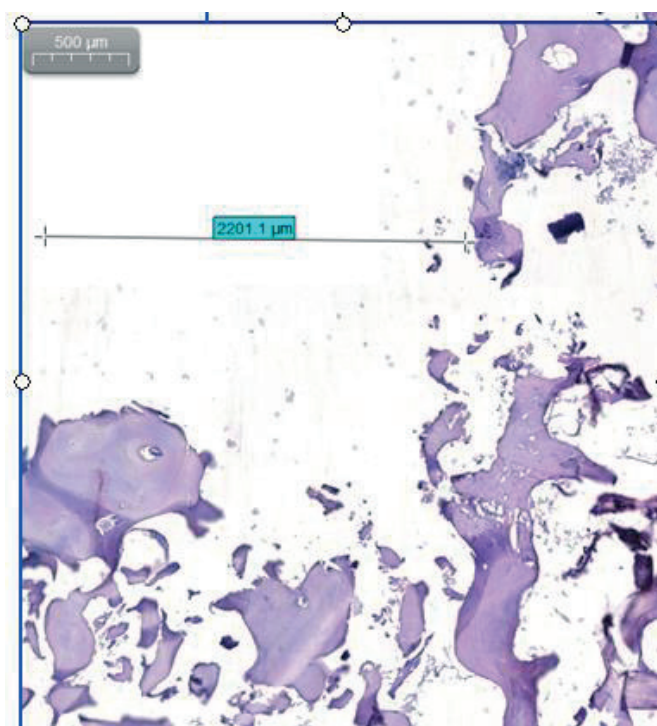


Рисунок 5. Гистологическая характеристика костной ткани после резекции ротационной фрезой. Микрофото. Окраска: гематоксисин, эозин. а - участок резекции бедренной кости область дефекта, увеличение x100; б - участок резекции бедренной кости область микропереломов, увеличение x100; в - участок резекции бедренной кости область ожога, увеличение x200



а



б

Рисунок 6. Гистологическая характеристика костной ткани после резекции осцилляторной пилой. Микрофото. Окраска: гематоксилин, эозин. Увеличение $\times 100$:

а - участки микропереломов трабекул; б - участок дефекта костной ткани

Количественный анализ показал, что протяжённость зоны дефекта во 2-й группе составила 1334 ± 120 мкм, что статистически значимо превышало соответствующий показатель в 1-й группе (339 ± 50 мкм, при уровне значимости $p < 0,05$). Гистологически данная зона демонстрировала более выраженную дезорганизацией ламеллярного строения во 2-й группе.

Зона микропереломов во 2-й группе была значительно шире и достигала 923 ± 80 мкм, тогда как в 1-й группе её протяжённость составляла в среднем 65 ± 18 мкм SD ($p < 0,01$). Микроскопически микропереломы проявлялись наличием множественных трещин костного матрикса, ориентированных преимущественно вдоль направления механического воздействия, с частичной фрагментацией костных трабекул. В образцах 1-й группы данные изменения носили ограниченный и очаговый характер, преимущественно в виде неполных переломов трабекул с сохранением ламеллярного рисунка.

Очаги термического повреждения также преобладали в 2-й группе, где их средняя протяжённость составила 521 ± 150 мкм, в то время как во 1-й группе данный показатель был значительно ниже при средних значениях 140 ± 30 мкм ($p < 0,01$). Гистологически некротические изменения характеризовались наличием пустых лакун, менее интенсивным накоплением красителя трабекулами и отсутствием ядер остецитов, и снижением клеточной плотности в прилежащих зонах (рисунок 7).

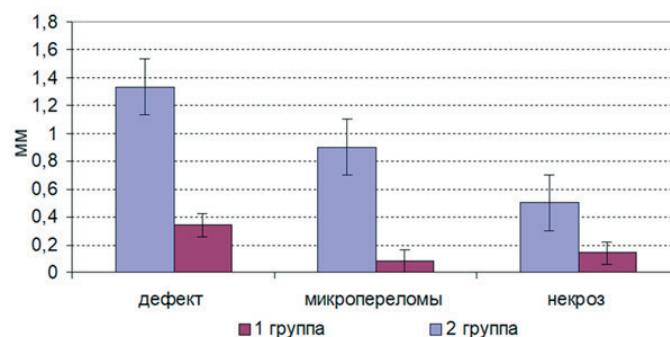


Рисунок 7. Средние значения ($M \pm SD$) параметров глубины костного дефекта, зоны микропереломов и некроза

При суммарной количественной оценке всех компонентов хирургической альтерации установлено, что общая глубина морфологических изменений во 2-й группе достигала 2778 ± 250 мкм, что в 4,97 раза превышало аналогичный показатель в 1-й группе (559 ± 100 мкм, $p < 0,05$) (рисунок 8). Микроскопически это соответствовало формированию широкой зоны механо-ишемического повреждения с постепенным переходом к относительно интактной костной ткани в глублежащих отделах.

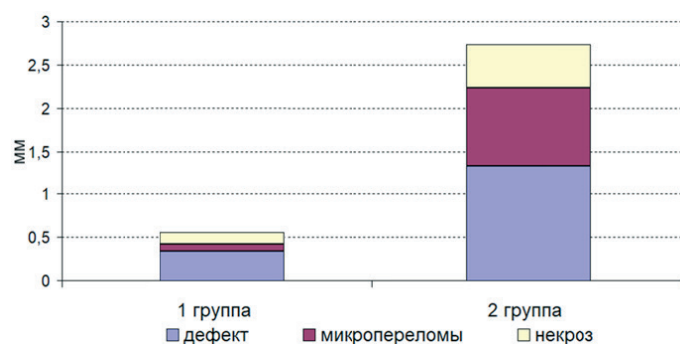


Рисунок 8. Сравнительная толщина суммарных механических повреждений и некротических изменений костной ткани в группах

Таким образом, количественная оценка морфологических данных свидетельствует о меньшей альтерации костной ткани у пациентов 1-й группы, что подтверждается статистически значимыми отличиями анализируемых параметров (таблица 2).

Таблица 2

Сравнение повреждений костной ткани в группах

Показатель (мкм)	1 группа (n=35), M ± SD	2 группа (n=32), M ± SD	p*
Дефект	339±50	1334±120	<0,05
Микропереломы	65±18	923±80	<0,01
Некроз	140±30	521±150	<0,01
Суммарно	559±100	2778±250	<0,05

Примечание: * - критерий Манна-Уитни

По рентгенологическим результатам изменения угла НКА после операции на протяжении 3 лет в группах отсутствует (критерий Манна-Уитни, $p < 0,05$). Отклонение до 1° в группе 1 отмечено в 33 % случаев, в группе 2 отклонение до 1° – 35 %; от 1° до 3° – в 41 %, более 3° – в 11 % случаев (рисунок 9).

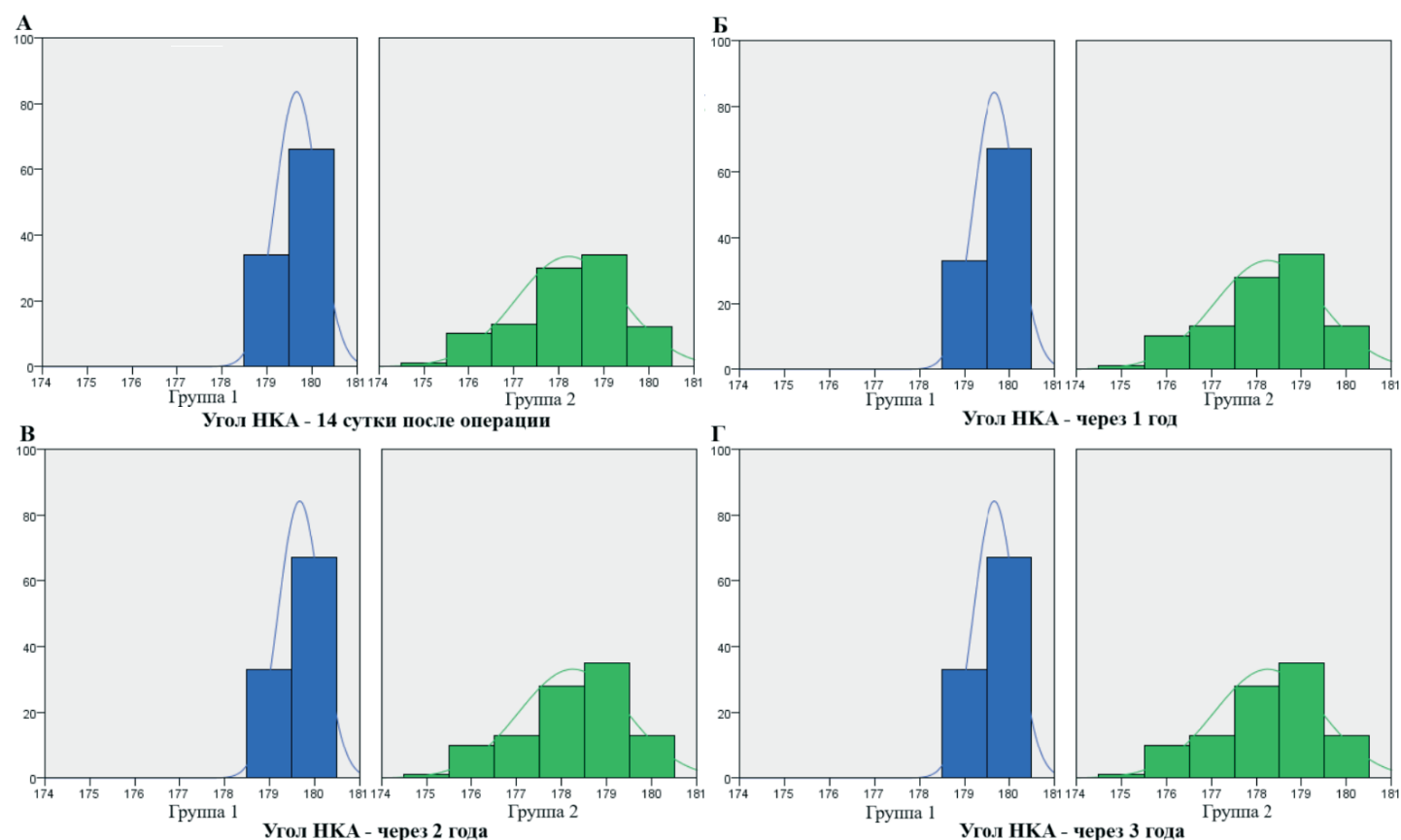


Рисунок 9. Динамика угла НКА в группах после операции: А - на 14 суток; Б - через 1 год; В - через 2 года, Г - через 3 года

Уровень болевого синдрома по ВАШ на 14 сутки после операции у пациентов группы 1 составил 60 (50; 70) баллов, в то время у пациентов группы 2 болевой синдром был выше – 70 (60; 70) баллов, что является статистически значимым, также через 2 года после операции имеется статистически значимое отличие с разницей медианы 10 баллов (критерий Манна-Уитни, $p < 0,05$) (таблица 3).

Таблица 3

Динамика уровня болевого синдрома по ВАШ (баллы)

Контрольный осмотр	Группа 1	Группа 2	p*
После операции	60 (50; 70)	70 (60; 70)	<0,05
Через 3 месяца	35 (30; 40)	40 (30; 40)	0,266
Через 6 месяцев	20 (10; 20)	20 (10; 30)	0,131
Через 1 год	0 (0; 10)	10 (0; 10)	0,085
Через 2 года	0 (0; 0)	0 (0; 10)	<0,05
Через 3 года	0 (0; 0)	0 (0; 0)	0,149

Примечание: * - критерий Манна-Уитни

При анализе субшкалы “WOMAC: Боль” статистически значимое отличие имеется через 3 года с момента операции с разницей в 1 балл ($p < 0,05$) (таблица 4).

Таблица 4

Динамика по субшкале WOMAC: Боль (баллы)

Контрольный осмотр	Группа 1	Группа 2	p*
После операции	15 (14,25; 16,75)	15 (14,25; 16)	0,103
Через 3 месяца	8 (7; 9)	8 (6; 9)	0,075
Через 6 месяцев	4 (3; 5)	3 (2; 4,75)	0,075
Через 1 год	2 (1; 3)	2 (1; 2)	0,083
Через 2 года	1 (1; 2)	1 (1; 2)	0,528
Через 3 года	1 (0; 1)	0 (0; 1)	<0,05

Примечание: * - критерий Манна-Уитни

Однако динамика по субшкале “WOMAC: Скованность” имеет статистическую разницу в группах на всем протяжении наблюдения, показывая лучшие результаты в группе 1 ($p < 0,05$) (таблица 5).

Таблица 5

Динамика по субшкале WOMAC: Скованность (баллы)

Контрольный осмотр	Группа 1	Группа 2	p*
После операции	6 (5; 6)	6 (6; 7)	<0,05
Через 3 месяца	3,5 (3; 4)	4 (4; 4)	<0,05
Через 6 месяцев	2 (1; 2)	2 (2; 3)	<0,05
Через 1 год	1 (1; 2)	2 (1; 2)	<0,05
Через 2 года	1 (0; 1)	1 (1; 2)	<0,05
Через 3 года	0 (0; 1)	1 (0; 1)	<0,05

Примечание: * - критерий Манна-Уитни

Статистически значимые отличия по субшкале “WOMAC: СЗФ” имеются через 14 суток, 3 месяца, 1 и 3 года после оперативного вмешательства (таблица 6).

Таблица 6

Динамика по субшкале WOMAC: СЗФ (баллы)

Контрольный осмотр	Группа 1	Группа 2	p*
После операции	52 (46; 55)	55 (54; 58)	<0,05
Через 3 месяца	36 (30,25; 40)	40 (37; 42)	<0,05
Через 6 месяцев	17 (14,25; 18)	17 (15; 20)	0,143
Через 1 год	13 (12; 14)	14 (12; 15)	<0,05
Через 2 года	9 (9; 10,75)	10 (9; 11)	0,203
Через 3 года	7 (6; 8)	8 (7; 9)	<0,05

Примечание: * - критерий Манна-Уитни

Поскольку исследование не было рандомизированным, по исходному уровню ИМТ и шкалы WOMAC группы различались ($p < 0,05$), проводился анализ по изменению показателей от исходного уровня (Δ WOMAC). Порог значимости после поправки Бонепфрони: $\alpha = 0,05 / 6 \approx 0,0083$.

Так по Δ WOMAC по субшкале “Боль” не выявлено различий между группами ни на одном сроке наблюдения. Статистическая значимость по субшкале “Скованность” имеется в раннем, на 14 сутки после операции, послеоперационном периоде в группе 1, в которой отражается более выраженная тенденция к уменьшению скованности ($p < 0,05$; $p < 0,0083$). В отдаленные сроки (1–3 года) выявлена устойчивая тенденция к улучшению функции в группе 1 при сравнении с группой 2 по субшкале “Степень затруднения функции” (таблица 7).

Таблица 7

Динамика по субшкале WOMAC (баллы)

Период сравнения	Боль				Скованность				Степень затруднения функции			
	Группа 1	Группа 2	p*	p**	Группа 1	Группа 2	p*	p**	Группа 1	Группа 2	p*	p**
После - до операции	-2 (-3;0)	-1 (-3;0,25)	0,702	0,768	-1 (-2; -1)	-1 (-2; 0)	<0,05		-6 (-10; -3,25)	-6 (-7,75; 3)	0,09	0,042
Через 3 мес. - до операции	-10 (-11; -8)	-9 (-11; -8)	0,65	0,575	-4 (-4; -3)	-3 (-4; -3)	<0,05	0,108	-21 (-26,75; -18)	-21 (-25,75; -18)	0,637	0,615
Через 6 мес. - до операции	-13,5 (-15; -12)	-13 (-15; -12)	0,639	0,601	-5 (-6; -5)	-5 (-5; -4)	<0,05	0,109	-43 (-46; -38)	-44 (-47; -40)	0,119	0,01
Через 1 год - до операции	-15 (-17; -14)	-15 (-16; -14)	0,287	0,846	-6 (-7; -5)	-6 (-6; -5)	0,449	1	-46 (-49; -43)	-47 (-50; -44,25)	<0,05	
Через 2 года - до операции	-16 (-17; -15)	-16 (-17; -14)	0,098	0,389	-6 (-7; -6)	-6 (-7; -5)	0,295	0,7	-49 (-52; -45)	-51 (-54; -48)	<0,05	
Через 3 года - до операции	-17 (-18; -16)	-1 (-18; -15)	0,375	0,973	-7 (-7; -6)	-7 (-7; -6)	0,596	0,793	-52 (-56; -49,25)	-53 (-56; -51)	0,058	<0,0083

Примечание: * - критерий Манна-Уитни; ** - поправка Бонферрони

Наблюдаемая динамика сравниваемых двух методик эндопротезирования показывает хорошие клинические результаты на протяжении всего наблюдения, однако в группе роботизированной артропластики в раннем послеоперационном периоде показатель скованности меньше, а функция коленного сустава лучше, но разница медиан в 1–2 балла не дает выраженного клинического эффекта.

Клинический случай №1 из группы № 1

Пациентка Р. 46 лет госпитализирована в 2022 году в УКБ №1 отделения травматологии, ортопедии и патологии суставов для проведения планового оперативного вмешательства. Пациентка отмечала жалобы на боль в области левого коленного сустава в течение 2 лет, ограничение движений в суставе. Лечилась консервативно по месту жительства с диагнозом: идиопатический левосторонний гонартроз 3 стадии по Kellgren-Lawrence, варусная деформация, комбинированная контрактура левого коленного сустава, болевой синдром. ИМТ пациентки составил 27,2 кг/м², угол НКА – 172°, уровень болевого синдрома по ВАШ – 70 баллов, оценка по шкале WOMAC: боль – 18 баллов, скованность – 6, степень затруднения функции – 60 баллов. Выполнено роботизированное тотальное эндопротезирование левого коленного сустава. Спустя 3 года, пациентка обратилась на консультацию для планового динамического осмотра (рисунок 10). Болевой синдром по ВАШ равен 0 баллов, по шкале WOMAC баллы были следующие: боль – 1 балл, скованность – 1 балл, степень затруднения функции – 7 баллов.

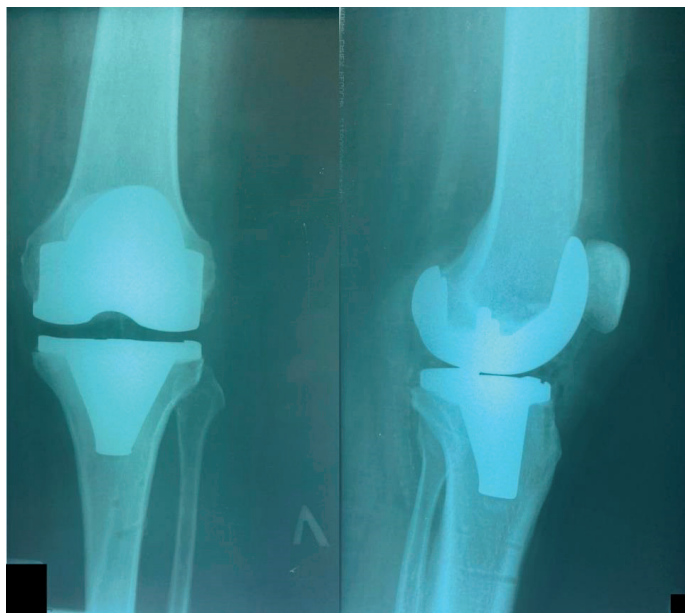


а

б



в



г

Рисунок 10. Клинический случай №1, группа 1. Внешний вид пациентки Р. 46 лет: а - вид спереди; б - вид сбоку (разгибание); в - вид сбоку (сгибание); г - рентгенография левого коленного сустава в прямой и боковой проекциях

Клинический случай № 2 из группы № 2

Пациентка Б. 70 лет госпитализирована в 2022 году в УКБ №1 отделения травматологии, ортопедии и патологии суставов для проведения планового оперативного вмешательства в объеме тотального эндопротезирования левого коленного сустава. Боль в коленных суставах беспокоила пациентку в течении 5–7 лет с разной интенсивностью. Лечилась консервативно по месту жительства с диагнозом: двусторонний идиопатический гонартроз 3–4 стадии по Kellgren-Lawrence с преимущественным поражением левого коленного сустава, комбинированная контрактура левого коленного сустава, болевой синдром (80 баллов по ВАШ). ИМТ пациентки составил 28,41 кг/м², угол НКА – 168°, оценка по шкале WOMAC: боль – 18 баллов, скованность – 8, степень затруднения функции – 65 баллов. Спустя 3 года, пациентка повторно госпитализировалась для планового оперативного лечения контралатерального коленного сустава (рисунок 11). Анкетирование после операции на левом коленном суставе следующее: болевой синдром по ВАШ равен 0 баллов, по шкале WOMAC: боль – 0 баллов, скованность – 1 балл, степень затруднения функции – 7 баллов.



а



б



Рисунок 11. Клинический случай №2, группа 2. Внешний вид пациентки Б. 70 лет: а - вид спереди; б - вид сбоку (разгибание и сгибание); в - рентгенография левого коленного сустава в прямой и боковой проекциях

Обсуждение

Результаты анализа гистологического материала в нашем исследовании показывают, что при роботизированной обработке костной ткани толщина некроза была в 3,7 раза, дефектов в 3,9 раза и микропереломов в 14,2 раза меньше по сравнению с ручной резекцией осцилляторной пилой. Объяснить это можно тем, что скорость вращения самой фрезы составляет 80000 оборотов в минуту, и во время её работы происходит постоянная ирригация физиологическим раствором, скорость которой можно регулировать. А также более жесткой фиксации нижней конечности пациента к роботу во время операции. Однако разница гистологических картин в нашем исследовании на клинические результаты не повлияла. Возможное отличие поверхности кости кроется в методе заточки режущих поверхностей инструментов, что требует дальнейшего изучения.

На кадаверных материалах S. Kreuzer и соав. (2022 г.) проанализировали костную поверхность сканирующей электронной микроскопией после роботизированной резекции автономной системой TSolution One. Поверхности среза костей имели среднюю шероховатость $0,16 \pm 0,06$ мм, дистальная плоскостность бедра – $0,11 \pm 0,03$ мм, больше-

берцовая плоскостность – $0,20 \pm 0,02$ мм. Промежуток между костью и имплантатом, рассчитанный по отклонениям пяти поверхностей среза бедренной кости от номинальных плоскостей среза, составлял менее 1 мм для 97,9 % поверхности, варьируясь от 94,2 % для задней поверхности до 100 % для дистальной поверхности [18]. Метод сканирующей электронной микроскопии – это еще один точный инструмент, предназначенный для получения изображения поверхности объекта с высоким пространственным разрешением, но в нашем исследовании он не был применен.

Luis E. Delgadillo и соав. (2020 г.) в своем исследовании провели анализ поверхности большеберцовой кости после ручной резекции на кадаверных материалах при помощи лазерной сканирующей системы и с последующим созданием трехмерной компьютерной модели поверхности, а также оценивался контакт кости с тибиальным компонентом бесцементной фиксации. Средняя плоскость поверхности составила $1,15 \pm 0,10$ мм (диапазон 0,56–1,81). Исследователями найдена закономерность, что в центральной зоне, в зоне крепления передней и задней крестообразных связок губчатая костная ткань была ниже на 0,2–0,5 мм плоскости наилучшего прилегания, в то время в боковых зонах уровень был выше на 0,0–0,3 мм. При оценке положения импланта, площадь контакта поверхностей между большеберцовым компонентом и костью составил 79 ± 3 % за счет пластической деформации обнаженной губчатой кости при остеотомии, хотя контакт варьировался от 56 % до 94 % [16]. В нашем исследовании гистологически зона дефекта, при роботизированном опиловании, имела в 3,9 раза менее выраженную дезорганизацией ламеллярного строения.

Как было описано ранее, что погрешность ручной резекции осцилляторной пилой во фронтальной плоскости может быть в диапазоне $1,5^\circ$ – $2,0^\circ$, а в сагиттальной в диапазоне $3,0^\circ$ – $4,0^\circ$, авторы отмечают, что ошибка во время резекции при повторном опиловании может увеличиться в среднем до 30,1 % во фронтальной и до 39,5 % в сагиттальной плоскости даже с использованием направляющего резекционного блока закрытого типа [17]. В другом исследовании авторы утверждают, что на погрешность опилования влияет люфт из-за несоответствия толщины пилящего полотна и прорезью направляющего резекционного блока [19]. Во время костной резекции происходит потеря металла от осциллирующего полотна до 1,13 мг массы, что может влиять на ускоренный износ эндопротеза [20]. Хотя данные исследования имеют давность публикации более 25 лет, однако по сей день во время ТЭКС используются направляющие резекционные блоки с разными вариантами их фиксации к кости.

Во время резекции, между костной поверхностью и резекционным инструментом возникает сила трения с выделением тепла, что может способствовать термическому некрозу костной ткани. В исследовании Tawy G.F. и соав. (2016 г.), подтверждается, что ирригация физиологическим раство-

ром препятствует развитию остеонекроза при выполнении опилов [21]. Londhe S. B. и соав. (2025 г.) провели сравнение термического повреждения кости между осциллирующей пилой и роботизированной фрезой. Процент погибших остеоцитов после костной резекции пилой составил 40,3 % против обработки фрезой – 46,5 % ($p=0,6309$), а минимальная глубина обнаружения жизнеспособных остеоцитов была $25,5\pm 3,5$ мкм и $27,1\pm 3,6$ мкм в группах ТЭКС и РоТЭКС соответственно ($p=0,091$). Авторы пришли к выводу, что оба хирургических метода сопоставимы по термическому воздействию на костную ткань [22].

Ran T. и соав. (2022 г.) апробировали новый способ остеотомии для ТЭКС ультра-импульсной CO_2 лазерной системой в эксперименте на животном в сравнении с пилой. При сканирующей электронной микроскопии и гистологическом анализе авторы обнаружили более гладкую поверхность костной ткани, отсутствие механических и термических повреждений губчатой и кортикальной ткани, а также более активное присоединение мезенхимальных стволовых клеток в зоне воздействия лазером. Размер механического повреждения пилой составил 243 ± 44 мкм, глубина термического повреждения – 44 ± 10 мкм, а объем костной лакуны – $55,6\pm 7$ % [23].

По результатам нашего трехлетнего наблюдения групп отмечается положительная динамика после тотальной артропластики коленного сустава при помощи роботической установки, так и традиционной техникой и имеется статистически значимая разница с разницей медиан 1–2 балла по шкале WOMAC, но, возможно, не имеет минимально важного клинического различия (MCID – Minimal Clinically Important Difference) [24–26].

Alrajeb R. и соав. (2024 г.) в систематическом обзоре, в котором сравнивается роботизированная методика эндопротезирования с традиционной, сообщают об отсутствии статистической разницы по шкале KSS в период наблюдения от 24 месяцев до 47 месяцев, по шкале WOMAC через 1 и 3 года и в амплитуде движений оперированного коленного сустава. Однако восстановление механической оси нижней конечности достигается лучше при РоТЭКС со статистически значимой разницей [5], что также подтверждается в нашем исследовании.

Опубликованное рандомизированное контролируемое исследование в 2020 году, в котором приняли участие 1406 пациентов, из которых были доступны для наблюдения 1348 пациентов, авторы провели сравнение двух методик ТЭКС на протяжении 13 ± 5 лет. В ходе исследования отмечено, что выживаемость эндопротеза через 15 лет в обеих группах составила 98 %, а отклонение механической оси на $3-5^\circ$ не повлияло на скорость асептического расшатывания (диапазон отклонения $0-3^\circ$ – 14 %, $3-5^\circ$ – 4 % в группе РоТЭКС; $0-3^\circ$ – 26 %, $3-5^\circ$ – 6 % в группе стандартного ТЭКС). Различий по частоте возникновения осложнений,

асептического расшатывания, общей выживаемости и функциональных показателей не наблюдалось [6].

Меньшая степень альтерации костной ткани способствует более равномерному и предсказуемому проникновению костного цемента в трабекулярную структуру кости.

Сохранённая микроархитектоника, отсутствие обширных зон микропереломов и некроза обеспечивают оптимальную пористость костной ткани, что позволяет цементу инфильтрировать трабекулярные пространства без формирования зон избыточного скопления или, напротив, недостаточного заполнения. Это создаёт полноценный цементно-костный интерфейс и улучшает первичную фиксацию импланта [27, 28].

Адекватное проникновение цемента в жизнеспособную костную ткань повышает механическую устойчивость цементной мантии. При минимальной альтерации кости снижается риск формирования микрополостей, трещин и слабых зон в области контакта цемента с костью, которые в дальнейшем могут становиться очагами концентрации напряжений. В результате уменьшается вероятность ранней микроподвижности импланта и развития цементной диссоциации под воздействием функциональных нагрузок [29, 30, 31, 32].

Кроме того, ограниченная травматизация костной ткани снижает выраженность локальной воспалительной реакции и последующей резорбции кости вокруг цементной мантии. Это способствует долговременному сохранению цементно-костного контакта и стабильному распределению нагрузок в перимплантной зоне. В совокупности данные факторы обеспечивают более надёжную фиксацию импланта, снижают риск асептической нестабильности и потенциально повышают срок службы импланта [33, 34].

В нашем исследовании есть недостатки: отсутствовали пациенты с вальгусной деформацией, не проводился гистологический анализ костной ткани у пациентов с подтвержденным остеопорозом [35] или выраженным локальным остеосклерозом, а также оценка наличия или отсутствия металла, оставшегося после использования режущих инструментов. Данные факты определяют направления дальнейших исследований.

Вывод

Гистологически РоТЭКС характеризуется меньшей степенью повреждения и меньшей шероховатостью поверхности костной ткани в 4,97 раза ($p<0,05$), чем при традиционном эндопротезировании коленного сустава, что не влияет на клинические трехлетние результаты.

Список литературы / References:

1. Лычагин А.В., Грицюк А.А., Елизаров М.П., Рукин Я.А., Грицюк А.Андр., Гавловский М.Я., Бердиев М. Рандомизированное двойное контролируемое сравнительное исследование точности выравнивания механической оси нижней конечности. *Медицинский вестник ГВКГ им. Н.Н. Бурденко*. 2023;4(3):40-47. <https://doi.org/10.26907/2542-0215.2023.4.3.40-47>.

- org/10.53652/2782-1730-2023-4-3-40-47 [A. V. Lychagin, A. A. Gritsyuk, Ya. A. Rukin, M. P. Elizarov, A. Andr. Gritsyuk, M. Ya. Gavlovsky, M. Berdiyev. Randomized double controlled study of the accuracy of lower limb mechanical axis alignment. *Medical Bulletin of the Main Military Clinical Hospital named after N.N. Burdenko*, 2023;4(3):40-47. <https://doi.org/10.53652/2782-1730-2023-4-3-40-47> (In Russ.)]
2. Лычагин А.В., Грицюк А.А., Рукин Я.А., Елизаров М.П., Грицюк А.А., Гавловский М.Я., Богатов Т.В. Клиническая эффективность и точность выравнивания механической оси при роботизированном тотальном эндопротезировании коленного сустава. *Гений ортопедии*. 2023;29(5):487-494. <https://doi.org/10.18019/1028-4427-2023-29-5-487-494>. EDN: QKZVVF. [Lychagin A.V., Gritsyuk A.A., Rukin Ya.A., Elizarov M.P., Gritsyuk A.A., Gavlovsky M.Ya., Bogatov T.V. Clinical evaluation and accuracy of mechanical axis alignment in robotic total knee arthroplasty. *Genij Ortopedii*. 2023;29(5):487-494. <https://doi.org/10.18019/1028-4427-2023-29-5-487-494> (In Russ.)]
3. Stulberg B.N., Zadzilka J.D. Active robotic technologies for total knee arthroplasty. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2021 Dec;141(12):2069-2075. <https://doi.org/10.1007/s00402-021-04044-2>. Epub 2021 Jul 14. PMID: 34259928.
4. Stulberg B.N., Zadzilka J.D., Kreuzer S., Kissin Y.D., Liebelt R., Long W.J., Campanelli V. Safe and effective use of active robotics for TKA: Early results of a multicenter study. *J Orthop*. 2021 Jul 23;26:119-125. <https://doi.org/10.1016/j.jor.2021.07.001>. PMID: 34393411; PMCID: PMC8346331.
5. Alrajeb R., Zarti M., Shuia Z., Alzobi O., Ahmed G., Elmhiregh A. Robotic-assisted versus conventional total knee arthroplasty: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Eur J Orthop Surg Traumatol*. 2024 Apr;34(3):1333-1343. <https://doi.org/10.1007/s00590-023-03798-2>. Epub 2023 Dec 22. PMID: 38133653; PMCID: PMC10980635.
6. Kim Y.H., Yoon S.H., Park J.W. Does Robotic-assisted TKA Result in Better Outcome Scores or Long-Term Survivorship Than Conventional TKA? A Randomized, Controlled Trial. *Clin Orthop Relat Res*. 2020 Feb;478(2):266-275. <https://doi.org/10.1097/CORR.0000000000000916>. Erratum in: *Clin Orthop Relat Res*. 2021 Jun 1;479(6):1407. <https://doi.org/10.1097/CORR.0000000000001813>. PMID: 31389889; PMCID: PMC7438149.
7. Khlopas A., Sodhi N., Hozack W.J., Chen A.F., Mahoney O.M., Kinsey T., Orozco F., Mont M.A. Patient-Reported Functional and Satisfaction Outcomes after Robotic-Arm-Assisted Total Knee Arthroplasty: Early Results of a Prospective Multicenter Investigation. *J Knee Surg*. 2020 Jul;33(7):685-690. <https://doi.org/10.1055/s-0039-1684014>. Epub 2019 Apr 8. PMID: 30959541.
8. Kayani B., Konan S., Tahmassebi J., Rowan F.E., Haddad F.S. An assessment of early functional rehabilitation and hospital discharge in conventional versus robotic-arm assisted unicompartmental knee arthroplasty: a prospective cohort study. *Bone Joint J*. 2019 Jan;101-B(1):24-33. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.101B1.BJJ-2018-0564.R2>. PMID: 30601042.
9. Feng S., Xing P., Qu J., Guo J., Song J., Li H., Jiang H., Pi H., Huang T. Robotic-assisted total knee arthroplasty achieves superior early postoperative outcomes compared to conventional techniques in patients with severe varus. *J Exp Orthop*. 2025 Oct 28;12(4):e70468. <https://doi.org/10.1002/jeo2.70468>. PMID: 41164322; PMCID: PMC12560254.
10. Xu J., Li L., Fu J., Xu C., Ni M., Chai W., Hao L., Zhang G., Chen J. Early Clinical and Radiographic Outcomes of Robot-Assisted Versus Conventional Manual Total Knee Arthroplasty: A Randomized Controlled Study. *Orthop Surg*. 2022 Sep;14(9):1972-1980. <https://doi.org/10.1111/os.13323>. Epub 2022 Jul 18. PMID: 35848154; PMCID: PMC9483055.
11. Held M.B., Gazgalis A., Neuwirth A.L., Shah R.P., Cooper H.J., Geller J.A. Imageless robotic-assisted total knee arthroplasty leads to similar 24-month WOMAC scores as compared to conventional total knee arthroplasty: a retrospective cohort study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2022 Aug;30(8):2631-2638. <https://doi.org/10.1007/s00167-021-06599-4>. Epub 2021 May 7. PMID: 33961067.
12. Schroer W.C., Berend K.R., Lombardi A.V., Barnes C.L., Bolognesi M.P., Berend M.E., Ritter M.A., Nunley R.M. Why are total knees failing today? Etiology of total knee revision in 2010 and 2011. *J Arthroplasty*. 2013 Sep;28(8 Suppl):116-9. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2013.04.056>. Epub 2013 Aug 15. PMID: 23954423.
13. Dragosloveanu S., Petre M.A., Cretu B., Mihailescu A.A., Cergan R., Scheau C. Etiology of Total Knee Arthroplasty Revisions: A Two-Decade Institutional Perspective. *Cureus*. 2024 Feb 29;16(2):e55263. <https://doi.org/10.7759/cureus.55263>. PMID: 38425332; PMCID: PMC10904024.
14. Jiang Y., Jia T., Wooley P.H., Yang S.Y. Current research in the pathogenesis of aseptic implant loosening associated with particulate wear debris. *Acta Orthop Belg*. 2013 Feb;79(1):1-9. PMID: 23547507.
15. Cherian J.J., Jauregui J.J., Banerjee S., Pierce T., Mont M.A. What Host Factors Affect Aseptic Loosening After THA and TKA? *Clin Orthop Relat Res*. 2015 Aug;473(8):2700-9. <https://doi.org/10.1007/s11999-015-4220-2>. Epub 2015 Feb 26. PMID: 25716213; PMCID: PMC4488212.
16. Delgadillo L.E., Jones H.L., Ismaili S.K., Han S., Noble P.C. How Flat Is the Tibial Osteotomy in Total Knee Arthroplasty? *J Arthroplasty*. 2020 Mar;35(3):870-876. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2019.10.007>. Epub 2019 Oct 9. PMID: 31694778.
17. Plaskos C., Hodgson A.J., Inkpen K., McGraw R.W. Bone cutting errors in total knee arthroplasty. *J Arthroplasty*. 2002 Sep;17(6):698-705. <https://doi.org/10.1054/arth.2002.33564>. PMID: 12216022.
18. Kreuzer S., Brar A., Campanelli V. Dimensional accuracy of TKA cut surfaces with an active robotic system. *Comput Assist Surg (Abingdon)*. 2022 Dec;27(1):41-49. <https://doi.org/10.1080/24699322.2022.2080116>. PMID: 35635837.
19. Otani T., Whiteside L.A., White S.E. Cutting errors in preparation of femoral components in total knee arthroplasty. *J Arthroplasty*. 1993 Oct;8(5):503-10. PMID: 8245995.
20. Gotterson P.R., Nusem I., Percy M.J., Crawford R.W. Metal debris from bony resection in knee arthroplasty--is it an issue? *Acta Orthop*. 2005 Aug;76(4):475-80. <https://doi.org/10.1080/17453670510041448>. PMID: 16195061.
21. Tawy G.F., Rowe P.J., Riches P.E. Thermal Damage Done to Bone by Burring and Sawing With and Without Irrigation in Knee Arthroplasty. *J Arthroplasty*. 2016 May;31(5):1102-8. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2015.11.002>. Epub 2015 Nov 10. PMID: 26718777.
22. Londhe S.B., Antao N., Shah R.V., Ali S.M., Rajendran A. Comparison of the thermal bone damage done by the oscillating saw and bone mill burr during total knee arthroplasty. *J Clin Orthop Trauma*. 2025 Mar 28;65:102992. <https://doi.org/10.1016/j.jcot.2025.102992>. PMID: 40242022; PMCID: PMC11999630.
23. Ran T., Lin C., Ma T., Qin Y., Li J., Zhang Y., Xu Y., Li C., Wang M.. Ultra-Pulsed CO₂ Laser Osteotomy: A New Method for the Bone Preparation of Total Knee Arthroplasty. *Front Bioeng Biotechnol*. 2022 Apr 29;10:858862. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.858862>. PMID: 35573227; PMCID: PMC9096707.

24. Kim M.S., Koh I.J., Choi K.Y., Sung Y.G., Park D.C., Lee H.J., In Y. The Minimal Clinically Important Difference (MCID) for the WOMAC and Factors Related to Achievement of the MCID After Medial Opening Wedge High Tibial Osteotomy for Knee Osteoarthritis. *Am J Sports Med.* 2021 Jul;49(9):2406-2415. <https://doi.org/10.1177/03635465211016853>. Epub 2021 Jun 11. PMID: 34115533.

25. Messier S.P., Beavers D.P., Queen K., Mihalko S.L., Miller G.D., Losina E., Katz J.N., Loeser R.F., DeVita P., Hunter D.J., Newman J.J., Quandt S.A., Lyles M.F., Jordan J.M., Callahan L.F. Effect of Diet and Exercise on Knee Pain in Patients With Osteoarthritis and Overweight or Obesity: A Randomized Clinical Trial. *JAMA.* 2022 Dec 13;328(22):2242-2251. <https://doi.org/10.1001/jama.2022.21893>. PMID: 36511925; PMCID: PMC9856237.

26. Silva M.D.C., Perriman D.M., Fearon A.M., Couldrick J.M., Scarvell J.M. Minimal important change and difference for knee osteoarthritis outcome measurement tools after non-surgical interventions: a systematic review. *BMJ Open.* 2023 May 18;13(5):e063026. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2022-063026>. PMID: 37202126; PMCID: PMC10201231.

27. Mann K.A., Miller M.A., Amendola R.L., Cyndari K.I., Horton J.A., Damron T.A., Oest M.E. Early Changes in Cement-Bone Fixation Using a Novel Rat Knee Replacement Model. *J Orthop Res.* 2019 Oct;37(10):2163-2171. <https://doi.org/10.1002/jor.24390>. Epub 2019 Jul 8. PMID: 31206747; PMCID: PMC6739174.

28. Norton M.R., Eyres K.S. Irrigation and suction technique to ensure reliable cement penetration for total knee arthroplasty. *J Arthroplasty.* 2000 Jun;15(4):468-74. <https://doi.org/10.1054/arth.2000.2965>. PMID: 10884207.

29. Zak S.G., Tang A., Pivec R., Meftah M., Austin M.S., Schnaser E., Schwarzkopf R. The effects of tourniquet on cement penetration in total knee arthroplasty. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2023 Jun;143(6):2877-2884. <https://doi.org/10.1007/s00402-022-04470-w>. Epub 2022 May 13. PMID: 35552801.

30. Ko D.O., Lee S., Kim K.T., Lee J.I., Kim J.W., Yi S.M. Cement Mantle Thickness at the Bone Cement Interface in Total Knee Arthroplasty: Comparison of PS150 RP and LPS-Flex Knee Implants. *Knee Surg Relat Res.* 2017 Jun 1;29(2):115-121. <https://doi.org/10.5792/ksrr.16.013>. PMID: 28545176; PMCID: PMC5450579.

31. Гиноян А.О., Минасов Т.Б., Хайрутдинов Р.М., Якупова Е.Р., Мухаметзянова Э.И., Аслямов Н.Н., Саубанов Р.А., Амелидинов Д.Р. Особенности артропластики при двустороннем гонартрозе. *Креативная хирургия и онкология.* 2019;9(3):194-198. <https://doi.org/10.24060/2076-3093-2019-9-3-194-198> [Ginoyan A.O., Minasov T.B., Khairutdinov R.F., Yakupova E.R., Mukhametzyanova E.I., Aslyamov N.N., Saubanov R.A., Ameldinov D.R. Features of Arthroplasty in Bilateral Knee Osteoarthritis. *Creative Surgery and Oncology.* 2019;9(3):194-198. <https://doi.org/10.24060/2076-3093-2019-9-3-194-198> (In Russ.)]

32. Комплексная реабилитация после повреждений коленного сустава. *Гений ортопедии.* 2010;(4). С. 29-31. [T.B. Minasov, L.R. Filatova, I.B. Minasov Complex rehabilitation after the knee injuries. *Genij Ortopedii.* 2010;(4).29-31 (In Russ.)]

33. Goodheart J.R., Miller M.A., Oest M.E., Mann K.A. Trabecular resorption patterns of cement-bone interlock regions in total knee replacements. *J Orthop Res.* 2017 Dec;35(12):2773-2780. <https://doi.org/10.1002/jor.23586>. Epub 2017 May 15. PMID: 28452065; PMCID: PMC5659954.

34. Cawley D.T., Kelly N., McGarry J.P., Shannon F.J. Cementing techniques for the tibial component in primary total knee replacement.

Bone Joint J. 2013 Mar;95-B(3):295-300. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.95B3.29586>. PMID: 23450010.

35. Minasov T.B., Gasser J.A., Matveev A.L., Trubin A.R., Gafarov I.R., Minasov I.B., Biswas S. Possibilities of hip arthroplasty on the background of impaired bone metabolism // *IOSR Journal of Dental and Medical Sciences.* 2015. Vol. 14. No. 6-3. P. 53-57.

Информация об авторах:

Лычагин Алексей Владимирович – доктор мед. наук, директор клиники, профессор, Заведующий кафедрой травматологии, ортопедии и хирургии катастроф Первого МГМУ им. И. М. Сеченова, e-mail: dr.lychagin@mail.ru, ORCID: 0000-0002-2202-8149;

Грицюк Андрей Анатольевич – доктор мед. наук, профессор кафедры травматологии, ортопедии и хирургии катастроф Первого МГМУ им. И. М. Сеченова, e-mail: drgaamma@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4202-4468;

Елизаров Михаил Павлович – кандидат мед. наук, заведующий травматолого-ортопедическим отделением, доцент кафедры травматологии, ортопедии и хирургии катастроф Первого МГМУ им. И. М. Сеченова, e-mail: elizarovm07@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4811-5718;

ORCID:0000-0002-8607-4347;

Сметанин Сергей Михайлович – доктор мед. наук, профессор кафедры травматологии, ортопедии и хирургии катастроф, Первый Московский государственный медицинский университет им. И. М. Сеченова (Сеченовский университет), e-mail: dr.smetaninsm@gmail.com,

ORCID:0000-0002-8607-4347;

Минасов Булат Шамильевич – доктор мед. наук, профессор, заведующий кафедрой травматологии, ортопедии ФГБОУ ВО БГМУ Минздрава России, SPIN-код: 2047-8868, AuthorID: 383849, e-mail: b.minasov@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-1733-9823;

Минасов Тимур Булатович – доктор мед. наук, профессор кафедры травматологии, ортопедии ФГБОУ ВО БГМУ Минздрава России, e-mail: m004@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-1916-3830;

Якупова Екатерина Ришатовна – ассистент кафедры травматологии, ортопедии ФГБОУ ВО БГМУ Минздрава России, e-mail: katty.yakupova1@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-5496-0766, SPIN-код: 1617-3278, AuthorID: 997774;

Глазунов Станислав Юрьевич – аспирант кафедры травматологии, ортопедии. ФГБОУ ВО БГМУ Минздрава России, Sglazunov87@mail.ru, ORCID: 0000-0003-1583-473X, SPIN-код: 9304-4799, AuthorID: 995644;

Кабилов Рахимбай Джалолович – аспирант кафедры травматологии, ортопедии ФГБОУ ВО БГМУ Минздрава России, e-mail: rakhimbai.kabirov.96@inbox, ORCID: 0000-0002-8886-3390, SPIN-код: 7643-2289, AuthorID: 1117568;

Саубанов Радмир Амирович – кандидат мед. наук, ассистент кафедры травматологии, ортопедии ФГБОУ ВО БГМУ Минздрава России, SPIN-код: 9848-9081, AuthorID: 968801, saubanov.radmir@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-8974-6188;

Гавловский Максим Ярославович – кандидат мед. наук, ассистент кафедры травматологии, ортопедии и хирургии катастроф Первого МГМУ им. И. М. Сеченова, e-mail: gavlovsky-m@yandex.ru, ORCID: 0009-0002-8854-6843.

Автор, ответственный за переписку: Гавловский Максим Ярославович

Information about authors:

Alexey V. Lychagin – Director of the Clinic, Head of the Department I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University). The Department of Traumatology, Orthopedics and Disaster Surgery, Professor. PhD in Medical Science, e-mail: clinic@travma.moscow. ORCID: 0000-0002-2202-8149;

Andrey A. Gritsyuk – I.M.Sechenov First Moscow State Medical University. The Department of Traumatology, Orthopedics and Disaster Surgery, Professor. PhD in Medical Science, e-mail: drgaamma@gmail.com. ORCID: 0000-0003-4202-4468;

Mikhail P. Elizarov – I.M.Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University). The Department of Traumatology, Orthopedics and Disaster Surgery PhD, assistant professor of the Department, e-mail: elizarovm07@gmail.com. ORCID: 0000-0002-4811-5718;

Sergey M. Smetanin – I.M.Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University). The Department of Traumatology, Orthopedics and Disaster Surgery, Dr. of Sci.(Med.), professor, e-mail: dr.smetaninsm@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8607-4347;

Bulat Sh. Minasov – Head of the Department «Bashkir State Medical University» of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation. The Department of Traumatology, Orthopedics, Professor. PhD in Medical Science. SPIN-code: 2047-8868, AuthorID: 383849, e-mail: b.minasov@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-1733-9823;

Timur B. Minasov – «Bashkir State Medical University» of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation. The Department of Traumatology, Orthopedics, Professor. PhD in Medical Science. e-mail: m004@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-1916-3830;

Ekaterina R. Yakupova – «Bashkir State Medical University» of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation. The Department of Traumatology, Orthopedics, assistant of the Department, e-mail: katya.yakupova1@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-5496-0766, SPIN-код: 1617-3278, AuthorID: 997774;

Stanislav Y. Glazunov – «Bashkir State Medical University» of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation. The Department of Traumatology, Orthopedics, post-graduate student. Sglazunov87@mail.ru, ORCID: 0000-0003-1583-473X, SPIN-код: 9304-4799, AuthorID: 995644;

Rahimbaj D. Kabirov – «Bashkir State Medical University» of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation. The Department of Traumatology, Orthopedics, post-graduate student. e-mail: rakhimbai.kabirov.96@inbox, ORCID: 0000-0002-8886-3390, SPIN-код: 7643-2289, AuthorID: 1117568;

Radmir A. Saubanov – «Bashkir State Medical University» of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation. The Department of Traumatology, Orthopedics, PhD, assistant of the Department. SPIN-код: 9848-9081, AuthorID: 968801, saubanov.radmir@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-8974-6188;

Maxim Ya. Gavlovsky – I.M.Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University). The Department of Traumatology, Orthopedics and Disaster Surgery PhD, assistant of the Department, e-mail: gavlovsky.m@yandex.ru. ORCID: 0009-0002-8854-6843

Corresponding author: Maxim Ya. Gavlovsky