

МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СУБХОНДРАЛЬНОЙ КОСТНОЙ ТКАНИ ПРИ ОСТЕОАРТРОЗЕ КОЛЕННОГО СУСТАВА

Б. Ш. Минасов¹, Р. Р. Якупов¹, В. Н. Акбашев¹✉, В. С. Щекин¹, А. О. Власова¹, Т. Б. Минасов¹, К. К. Каримов², А. А. Ахмельдинова¹

¹ Башкирский государственный медицинский университет, Уфа, Россия

² Таджикский государственный медицинский университет имени Абуали ибни Сино, Душанбе, Таджикистан

Морфологические изменения субхондральной костной ткани при остеоартрозе коленного сустава являются ключевым звеном патогенеза и могут предшествовать разрушению суставного хряща. Целью исследования было выявить характерные морфологические и морфометрические признаки остеосклероза и остеопороза в субхондральной зоне бедренной и большеберцовой костей. Выполняли анализ 40 участков костной ткани, полученных при эндопротезировании коленного сустава у 20 пациентов (12 женщин и 8 мужчин) в возрасте 58–75 лет с остеоартрозом III–IV стадий. При гистологической и морфометрической оценке с использованием световой микроскопии и расчетом индекса микрофрактуринга (MFI) установлены достоверные различия в толщине трабекул, интертрабекулярном расстоянии и степени микроповреждений между участками склероза и остеопороза. Повышенные значения MFI в зонах остеопороза могут отражать снижение прочности субхондральной кости. Полученные данные подтверждают диагностическую значимость морфометрической оценки субхондральной зоны и перспективность применения MFI как количественного критерия риска при планировании ортопедического лечения.

Ключевые слова: остеоартроз, субхондральная, кость, остеосклероз, остеопороз, морфометрия, микротрещины, индекс микрофрактуринга

Вклад авторов: Б. Ш. Минасов — концепция и дизайн исследования, анализ и интерпретация данных, редактирование текста; Р. Р. Якупов — сбор материала, морфологическое исследование, первичная обработка данных; В. Н. Акбашев — статистическая обработка, визуализация результатов, написание рукописи; В. С. Щекин — анализ литературы, интерпретация морфологических данных; А. О. Власова — подготовка иллюстраций, морфометрический анализ, редактирование текста; Т. Б. Минасов — оформление и подготовка иллюстраций, обсуждение; К. К. Каримов — сбор материала, клиническое наблюдение пациентов; А. А. Ахмельдинова — составление критериев включения/исключения, координация этического одобрения.

Соблюдение этических стандартов: исследование одобрено этическим комитетом ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет» Минздрава России (протокол № 3 от 12 марта 2025 г.), проведено с соблюдением Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации (в редакции 2013 г.). Все пациенты подписали добровольное информированное согласие на участие в исследовании.

✉ **Для корреспонденции:** Владислав Николаевич Акбашев
ул. Ленина, д. 3, г. Уфа, 450008, Россия; vlad-akb@mail.ru

Статья получена: 06.04.2025 **Статья принята к печати:** 20.04.2025 **Опубликована онлайн:** 30.04.2025

DOI: 10.24075/vrgmu.2025.024

Авторские права: © 2025 принадлежат авторам. **Лицензиат:** РНИМУ им. Н. И. Пирогова. Статья размещена в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии Creative Commons Attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

MORPHOLOGICAL SUBCHONDRAL BONE TISSUE CHARACTERISTICS IN KNEE OSTEOARTHRITIS

Minasov BSh¹, Yakupov RR¹, Akbashev VN¹✉, Shchekin VS¹, Vlasova AO¹, Minasov TB¹, Karimov KK², Akhmeldinova AA¹

¹ Bashkir State Medical University, Ufa, Russia

² Avicenna Tajik State Medical University, Dushanbe, Tajikistan

Morphological subchondral bone tissue alterations associated with knee osteoarthritis represent a key pathogenesis link and can precede articular cartilage destruction. The study aimed to identify typical morphological and morphometric signs of osteosclerosis and osteoporosis in the subchondral zone of the femur and tibia. Analysis of 40 bone tissue fragments collected when performing knee replacement surgery in 20 patients (12 females and 8 males) aged 58–75 years with stage III–IV osteoarthritis was performed. Histological and morphometric assessment involving the use of light microscopy and microfracture index (MFI) calculation revealed significant differences in trabecular thickness, intertrabecular distance, and the degree of microdamage between the sites of sclerosis and osteoporosis. High MFI values in the zones of osteoporosis can reflect reduced subchondral bone strength. The findings confirm the diagnostic value of the subchondral zone morphometry and the prospects of using MFI as a quantitative risk criterion when planning orthopedic treatment.

Keywords: osteoarthritis, subchondral bone, osteosclerosis, osteoporosis, morphometry, microcracks, microfracture index

Author contribution: Minasov BSh — study concept and design, data analysis and interpretation, manuscript editing; Yakupov RR — material collection, morphological assessment, primary data processing; Akbashev VN — statistical processing, visualization of results, manuscript writing; Shchekin VS — literature review, morphology data interpretation; Vlasova AO — preparing illustrations, morphometry analysis, manuscript proofreading; Minasov TB — preparing illustrations, discussion; Karimov KK — material collection, clinical follow-up of patients; Akhmeldinova AA — drawing up inclusion/exclusion criteria, coordination of ethical approval.

Compliance with ethical standards: the study was approved by the Ethics Committee of the Bashkir State Medical University (protocol No. 3 dated 12 March 2025) and conducted in accordance with the World Medical Association Declaration of Helsinki (2013 revision). All patients submitted the informed consent to participation in the study.

✉ **Correspondence should be addressed:** Vladislav N. Akbashev
Lenina, 3, Ufa, 450008, Russia; vlad-akb@mail.ru

Received: 06.04.2025 **Accepted:** 20.04.2025 **Published online:** 30.04.2025

DOI: 10.24075/brsmu.2025.024

Copyright: © 2025 by the authors. **Licensee:** Pirogov University. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Остеоартрит (ОА) — одно из наиболее распространенных и социально значимых заболеваний опорно-двигательного аппарата, представляющее собой прогрессирующее, мультифакторное поражение соединительной ткани, ведущее к нарушению кинематического баланса скелета. Он сопровождается острой и хронической болью, ограничением подвижности и высокой вероятностью инвалидизации, особенно среди лиц пожилого возраста. Согласно данным ВОЗ, от симптоматического ОА страдают более 240 млн человек, и эта цифра продолжает неуклонно расти с увеличением продолжительности жизни [1, 2]. Современное представление о патогенезе ОА выходит за рамки локального поражения суставного хряща. Сегодня это заболевание рассматривают как системное нарушение биомеханики и метаболизма соединительной ткани, при котором страдают все компоненты сустава: хрящ, субхондральная кость, синовиальная оболочка, связки, капсула и околоуставные мышцы [3, 4]. Центральным элементом становится дисбаланс между адаптационными и деструктивными процессами, возникающий под действием перегрузки, воспаления и нарушений тканевого гомеостаза [5]. В последние годы особое внимание уделяют субхондральной кости как ключевому звену патогенеза ОА. Выявлено, что нарушения ее структуры — в том числе остеосклероз, остеопороз, субхондральные микротрещины и ремоделирование трабекул — могут предшествовать дегенерации хряща и существенно влиять на прогрессирование заболевания [6–8]. Эти изменения рассматривают как следствие хронической перегрузки и нарушений механотрансдукции в условиях нестабильного биомеханического равновесия.

Одним из ключевых звеньев патогенеза ОА является структурная несостоятельность субхондральной кости, которая выполняет роль не только биомеханической опоры хряща, но и регулятора обменных процессов [9]. Постадийное развитие заболевания клинически проявляется комплексом склеротических, остеопоротических и остеолитических процессов. Их одновременное присутствие формирует гетерогенную морфологическую картину, отражающую столкновение компенсаторных и деструктивных изменений. Эти трансформации не ограничиваются анатомией: они связаны с нарушением кинематических связей, изменением вектора силовых нагрузок и, как следствие, клинической манифестацией боли и дисфункции [10].

Биомеханический аспект ОА приобретает ключевое значение в связи с галопирующим развитием синдрома гиперпрессии. Сустав функционирует как единая система, поддерживающая кинематический баланс благодаря жидкокристаллической организации соединительной ткани [11]. Нарушение этого равновесия ведет к перегрузке отдельных компонентов и запускает каскад деструктивно-дистрофических реакций. Меняющаяся картина внутритканевого напряжения угнетает роль клеток механостатов. Дисбаланс жидкокристаллической организации приводит к гибели механоцитов.

Визуализация и количественная оценка этих процессов стали возможны благодаря современным гистологическим и морфометрическим методам. Анализ тонких срезов субхондральной кости с применением цифровых технологий позволяет выявлять изменения на микроуровне, включая перестройку трабекулярной архитектуры, субхондральный склероз, остеофитоз и остеолит. Эти данные позволяют не только уточнить диагноз, но и оценить стадию заболевания, спрогнозировать его течение и адаптационные ресурсы макроорганизма [12].

В связи с этим возрастает значение интегративного, многофакторного подхода, сочетающего биомеханику, морфологию и клиническую оценку. Только в рамках такой модели можно понять истинную природу ОА — не как локальной болезни сустава, а как системной дисфункции соединительной ткани в условиях нестабильного динамического равновесия.

Цель исследования — оценить морфологические и морфометрические особенности субхондральной костной ткани у пациентов с ОА коленного сустава III–IV стадий, выявить различия между участками остеосклероза и остеопороза, а также обосновать индекс микрофрактуринга (Microfracturing Index, MFI) как количественный критерий структурной прочности субхондральной зоны.

ПАЦИЕНТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили в Морфологической лаборатории Института фундаментальной медицины ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет» Минздрава России.

Критерии включения: возраст пациентов старше 55 лет; клинически и рентгенологически подтвержденный первичный (идиопатический) остеоартроз III–IV стадий по классификации Kellgren–Lawrence с длительностью не менее 5 лет; выполнение тотального эндопротезирования коленного сустава; наличие информированного добровольного согласия.

Критерии исключения: наличие ревматических заболеваний; системных метаболических нарушений (включая остеопороз, подтвержденный денситометрически); наличие злокачественных новообразований; перенесенные хирургические вмешательства на том же суставе ранее; хронические заболевания в стадии декомпенсации; наличие инфекции в области оперированного сустава; длительный прием стероидных гормонов; отказ от участия в исследовании.

Материал исследования

Всего в исследование было включено 20 пациентов (12 женщин и 8 мужчин) в возрасте 58–75 лет (средний возраст — $66,4 \pm 5,2$ года), которым проводили плановое одностороннее тотальное эндопротезирование коленного сустава по поводу остеоартроза III–IV стадий по классификации Kellgren–Lawrence. Забор операционного материала осуществляли по стандартной методике в однотипных точках, определяемых приоритетным вектором силового напряжения и вне его (внутренние и наружные мыщелки бедра и голени). Размер образцов составлял 10×15 мм. У всех пациентов были выделены участки субхондральной костной ткани, характеризующиеся признаками уплотнения (osteosclerosis) или разрежения (osteoporosis). В ряде случаев оба типа изменений наблюдались в пределах одного образца, что позволило провести внутриобъектное сравнение.

Всего было проанализировано 40 участков костной ткани: 20 с признаками остеосклероза и 20 — с признаками остеопороза. Несмотря на возможность получения до 80 участков (по 4 зоны с каждого пациента), для морфометрического анализа были отобраны 40 наиболее информативных — по два участка на пациента: один с признаками остеосклероза, другой — с остеопорозом. Это обеспечило внутриобъектное сопоставление разнотипных изменений, повышающее точность сравнительного анализа.

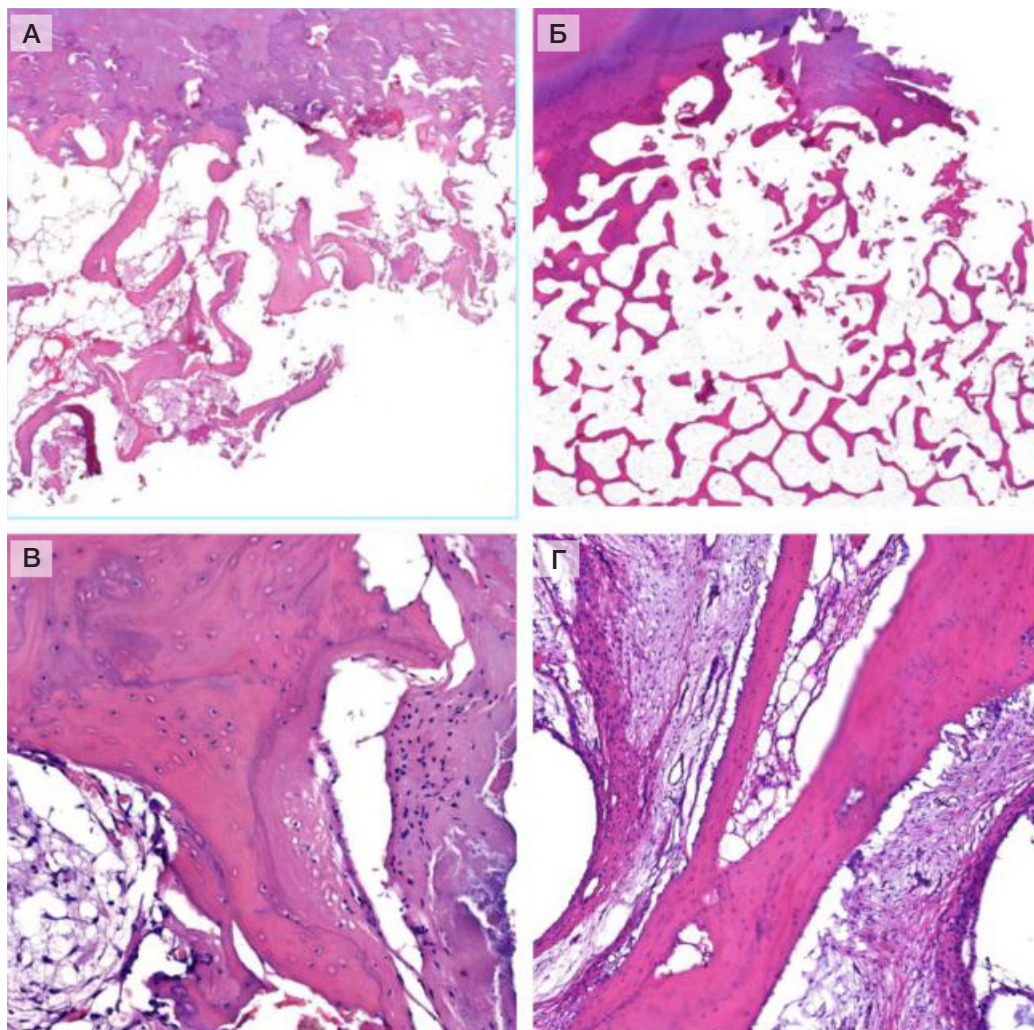


Рис. 1. Морфологические изменения в уплотненных участках субхондральной костной ткани при остеоартрозе. Гистологическое окрашивание гематоксилином и эозином; увеличение $\times 20$ (А, Б), $\times 200$ (В, Г). А. Фрагмент субхондральной зоны бедренной кости: утолщенные трабекулы, анастомозирующая трабекулярная структура, суженные интертрабекулярные пространства. Б. Участок большеберцовой кости: массивные остеосклеротические трабекулы, хаотичное расположение, уменьшение количества гаверсовых каналов, частичное замещение интертрабекулярного пространства фиброзной тканью. В. Паратрабекулярная зона с признаками склеротической перестройки: дезорганизация пластинчатой структуры, очаги соединительнотканного замещения. Г. Костномозговое пространство: диффузное замещение фиброзной тканью с преобладанием коллагеновых волокон, трабекулы с редуцированными остеоцитарными лакунами

Методы гистологической обработки

Образцы немедленно фиксировали в 10%-м забуференном нейтральном формалине (Histosafe; Бюовитрум, РФ) в течение 24–48 ч при температуре $+4^{\circ}\text{C}$. Декальцинацию осуществляли с использованием раствора Трилон Б («АГАТ-МЕД», Россия) до полного удаления минерального компонента. Гистологическую проводку выполняли на автоматическом карусельном процессоре (АГОТ-1, РФ) с использованием изопропиловых спиртов возрастающей концентрации. Парафинирование осуществляли с использованием реагентов производства Бюовитрум (Россия). Срезы толщиной 4 мкм изготавливали на ротационном микротоме HM340E (Thermo Fisher Scientific, США). Гистологическое окрашивание проводили гематоксилином и эозином (Бюовитрум, Россия) с использованием автоматической станции Gemini AS (Thermo Fisher Scientific, США).

Микроскопия и цифровая обработка

Окрашенные препараты были отсканированы на цифровом сканирующем микроскопе Pannoramic 250 (3DHISTECH

Ltd., Венгрия) с объективом Plan-APOCHROMAT 20 $\times$ (Zeiss, Германия). Изучение гистологических препаратов проводили с помощью программ CaseViewer (3DHISTECH Ltd., Венгрия) и QuPath v.0.5.1 (Bankhead P. et al., Sci Rep 7, 16878, 2017).

Морфометрический анализ

В пяти независимых полях зрения при увеличении $\times 100$ проводили измерение следующих параметров:

- 1) толщина костных балок (мкм);
- 2) межбалочное (интертрабекулярное) расстояние (мкм);
- 3) ширина базофильной (tidemark) линии на границе хрящевой и субхондральной зоны (мкм).

При морфометрии под базофильной линией понимали зону кальцифицированного хряща, визуализируемую как интенсивно окрашенный базофильный слой в препаратах, окрашенных гематоксилином и эозином. Измерения выполняли на максимально перпендикулярных участках между границей хряща и началом трабекулярной кости. Учитывали ширину окрашенной полосы, а не клеточные элементы.

Морфометрию выполняли вручную с использованием функционала QuPath. Дополнительно рассчитывали

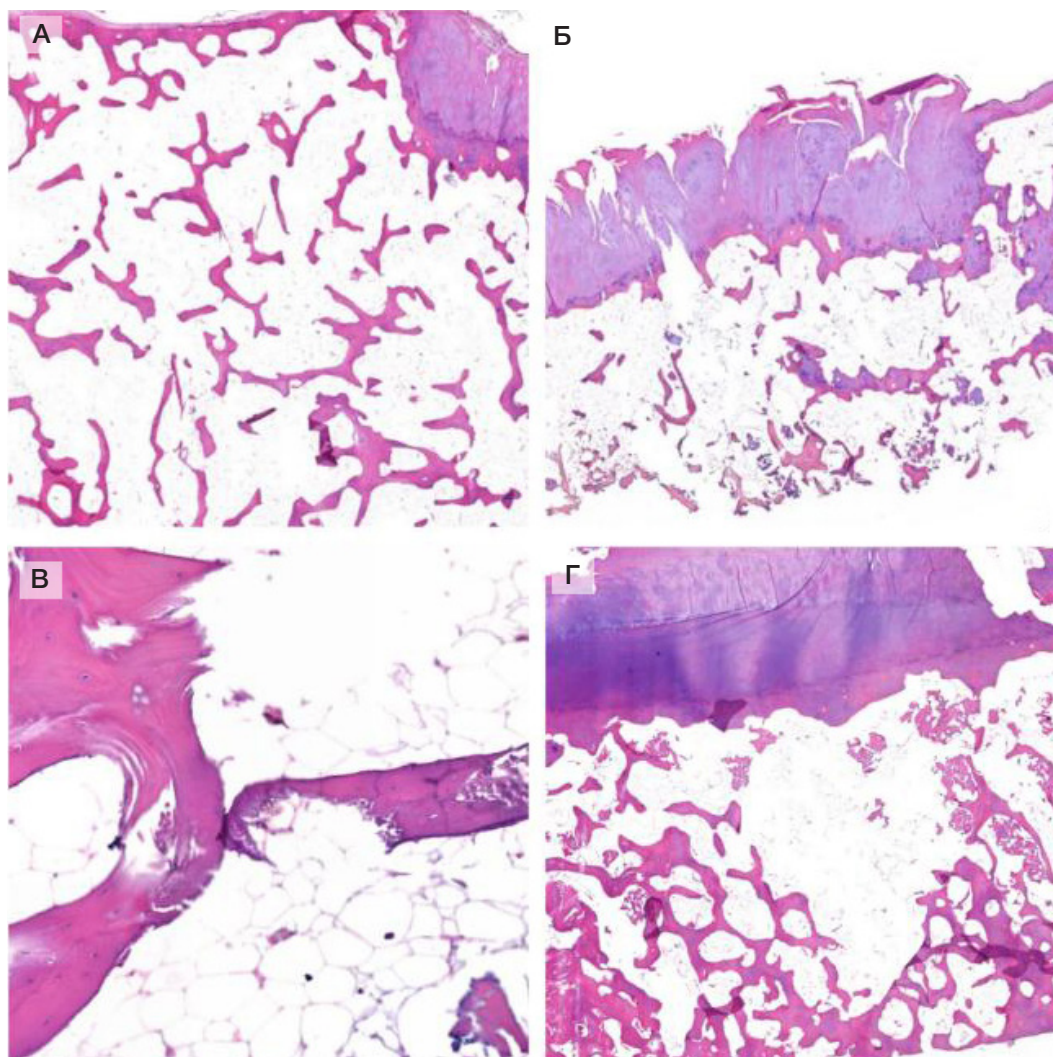


Рис. 2. Морфологическая характеристика участков разреженной субхондральной костной ткани при остеоартрозе. Гистологическое окрашивание гематоксилином и эозином; увеличение $\times 20$ (А, Б), $\times 200$ (В, Г). А. Субхондральная зона бедренной кости: истонченные трабекулы, расширенные интертрабекулярные пространства, единичные микротрещины. Б. Участок большеберцовой кости: дезорганизация трабекулярной структуры, разреженная архитектура, фрагментация костных балок. В. Паратрабекулярная зона бедренной кости: выраженные интертрабекулярные пространства, заполненные жировым костным мозгом, трабекулы с признаками истончения. Г. Костномозговое пространство большеберцовой кости: участки фиброзной трансформации, линейные дефекты в трабекулах

количество микроповреждений (микротрещин) костной ткани, приведенное к площади исследования (мм^2).

Статистический анализ

Статистическую обработку данных проводили с использованием программного обеспечения Statistica 13.0 (StatSoft Inc., США) и GraphPad Prism 9.0 (GraphPad Software, США). Проверку нормальности распределения выборок осуществляли с применением критерия Шапиро–Уилка. Поскольку большинство показателей не соответствовали нормальному распределению, количественные данные представлены в виде медианы и интерквартильного размаха (Ме (25–75%)). Для сравнения независимых групп использовали *U*-критерий Манна–Уитни, а при сравнении более чем двух групп — *H*-критерий Краскела–Уоллиса с последующим парным сравнением.

Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При микроскопическом изучении образцов субхондральной костной ткани бедренной и большеберцовой костей у

пациентов с остеоартрозом были выявлены характерные гистологические изменения, соответствующие двум противоположным патологическим процессам: остеосклерозу и остеопорозу.

В участках уплотненной костной ткани (УКТ) наблюдалось выраженное утолщение трабекул с увеличением продукции костного матрикса. Трабекулы плотно анастомозировали между собой, формируя грубоволокнистые структуры (рис. 1А, Б). Интертрабекулярные пространства были значительно сужены и частично замещены фиброзной тканью (рис. 1Б). В отдельных случаях отмечались очаги эндостального фиброза, дегенеративные изменения остеоцитов и локальная гиперплазия остеобластов (рис. 1В, Г).

В участках разреженной костной ткани (РКТ) была выявлена противоположная картина: выраженное истончение и фрагментация костных трабекул, расширение интертрабекулярных пространств, которые преимущественно были заполнены жировой тканью. Наблюдались множественные микротрещины в атрофированных трабекулах и единичные остеобласты при увеличенном количестве остеокластов (рис. 2).

Морфометрический анализ показал значимые различия между УКТ и РКТ по толщине костных балок и

Таблица 1. Морфометрические показатели субхондральной кости в исследуемых группах (Me (25–75%))

Показатель	Склероз: бедренная кость ($n = 10$)	Склероз: большеберцовая кость ($n = 10$)	Остеопороз: бедренная кость ($n = 10$)	Остеопороз: большеберцовая кость ($n = 10$)	Н-критерий Краскела–Уоллиса (p)
Толщина трабекул, мкм	122,4 (89,1–178,6)	139,6 (99,2–193,6)	114,5 (87,8–155,9)	131,4 (95,1–180,8)	$H = 41,03$ ($p = 0,0001$)
Интертрабекулярное расстояние, мкм	334,7 (232,6–442,3)	300,7 (219,4–413,9)	289,7 (197,3–402,4)	310,2 (211,4–431,9)	$H = 11,01$ ($p = 0,0001$)
Ширина tidemark, мкм	62,5 (47,3–78,7)	66,4 (47,7–105,1)	64,3 (44,6–79,5)	81,6 (61,5–113,4)	$H = 9,55$ ($p = 0,0229$)

Примечание: значения представлены как медиана (25–75-й перцентили). Статистическую значимость парных различий между группами оценивали с использованием U -критерия Манна–Уитни. Различия считали значимыми при $p < 0,05$.

интертрабекулярному пространству. Толщина костных балок была достоверно выше в участках остеосклероза по сравнению с остеопорозом ($p < 0,001$), при этом интертрабекулярные пространства были увеличены в областях остеопороза (табл. 1).

Морфометрический анализ показал, что в участках остеосклероза толщина трабекул в большеберцовой кости была статистически значимо выше, чем в бедренной ($p = 0,0007$), тогда как интертрабекулярное расстояние, напротив, оказалось больше в бедренной кости ($p = 0,0377$). В участках остеопороза трабекулы в бедренной кости были достоверно тоньше по сравнению с аналогичными зонами большеберцовой кости ($p = 0,0001$). Эти различия отражают особенности локального ремоделирования субхондральной костной ткани в зависимости от анатомической области и характера нагрузки. Кроме того, ширина базофильной линии была достоверно больше в большеберцовой кости по сравнению с бедренной ($p = 0,0035$) и значимо отличалась при сравнении бедренной (УКТ) и большеберцовой (РКТ) костей ($p = 0,0113$).

Особый интерес представлял анализ количества микротрещин (коэффициент ломкости) в исследуемых образцах. Установлено, что медиана коэффициента ломкости была выше в участках разрежения костной ткани (РКТ) и составила 0,25 по сравнению с участками уплотнения (УКТ), где коэффициент составил 0,20 (рис. 3). Эти различия были статистически значимы (U -критерий Манна–Уитни; $p < 0,05$). При сравнении полученных данных с контрольными значениями, представленными

в литературе, было показано, что оба исследованных состояния характеризуются увеличением количества микротрещин относительно контроля, однако наиболее выраженные отличия от контрольной группы были зарегистрированы именно в участках остеопороза [13] (рис. 4).

Индекс микроповреждений как прогностический критерий

В исследуемых образцах медиана MFI в участках остеосклероза составила 0,20, в участках остеопороза — 0,25. Эти различия статистически значимы ($p < 0,05$). На основании распределения значений предлагается предварительная шкала риска (табл. 2).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные данные демонстрируют наличие выраженных морфологических различий между участками субхондральной кости с признаками остеосклероза и остеопороза при остеоартрозе коленного сустава. Толщина трабекул была статистически значимо выше в участках склероза, тогда как интертрабекулярные пространства были расширены в зонах разрежения. Эти результаты подтверждают, что остеоартрит сопровождается гетерогенными процессами ремоделирования, направленными как на уплотнение, так и на структурную дезорганизацию костной ткани в субхондральной зоне.

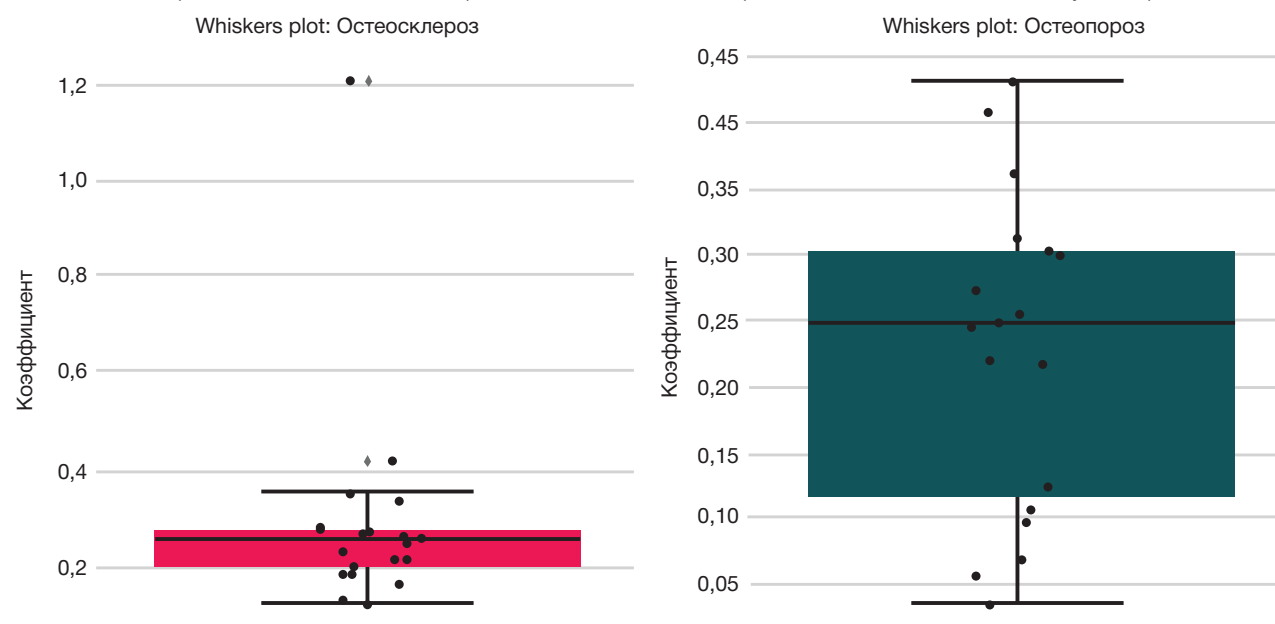


Рис. 3. Распределение коэффициентов в участках уплотнения и разрежения костной ткани. Представлены медианные значения и интерквартильный размах. В анализ включены 40 участков (по 2 от каждого пациента; $n = 20$), отобранных из внутреннего и наружного мыщелков бедренной и большеберцовой костей. Участки остеопороза характеризуются достоверно более высокими значениями MFI по сравнению с участками склероза ($p \leq 0,05$)

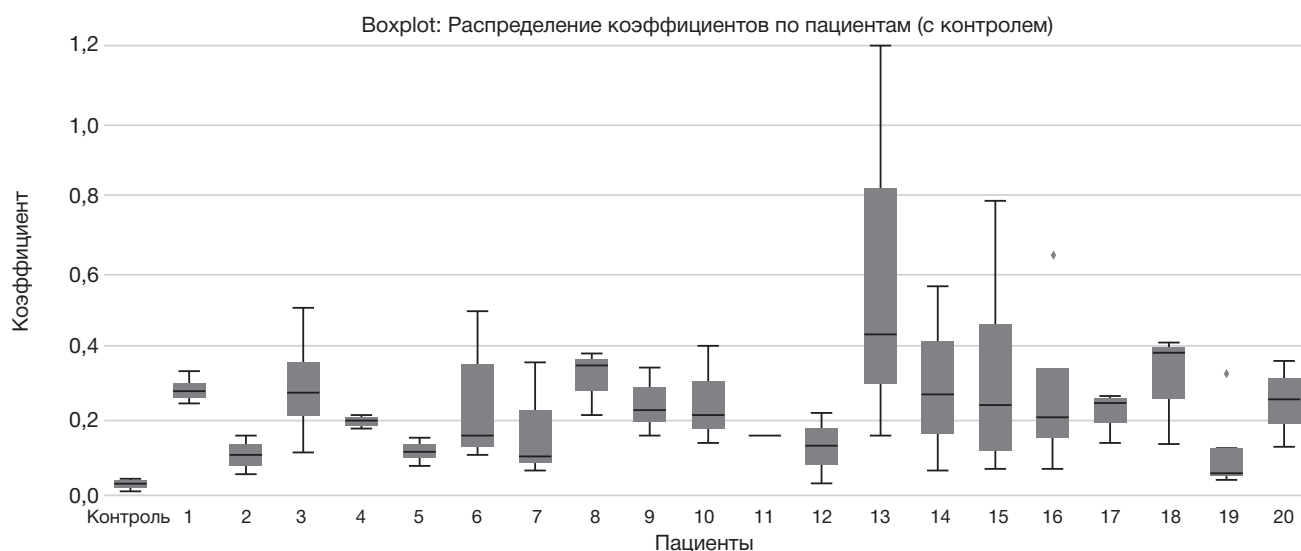


Рис. 4. Индекс микрофрактуринга (MFI) костной ткани у пациентов с остеоартрозом (по данным участков остеосклероза и остеопороза бедренной и большеберцовой костей) по сравнению с литературными данными [13]. Представлены агрегированные значения MFI для каждого пациента ($n = 20$), включающие по два участка (утолщение и разрежение). Литературные данные приведены для ориентировочного сопоставления, но не использовались в качестве контрольной группы

Структурные особенности выявленных изменений соответствуют данным литературы, в которых подчеркивается ключевая роль субхондральной кости в патогенезе остеоартроза. Начальные изменения в трабекулярной архитектуре субхондральной кости могут предшествовать хондральной дегенерации и быть связанными с нарушением механотрансдукции и микроциркуляции. В участках остеосклероза формируется уплотненная структура с атипичной ориентацией трабекул, что может приводить к нарушению амортизационной функции и увеличению нагрузки на суставной хрящ. В свою очередь, зоны остеопороза демонстрируют снижение плотности и микрофрагментацию, что может способствовать снижению прочности субхондральной зоны и повышенному риску микропереломов.

Для сопоставления полученных морфометрических характеристик использованы опубликованные в литературе данные, полученные с применением микро-КТ-визуализации у женщин в возрасте 32–37 и 78–80 лет [13]. Следует отметить, что методологические различия (оптическая микроскопия vs. микро-КТ), а также различия по возрасту и полу не позволяют использовать эти данные как прямой контроль. Однако они были привлечены как ориентировочная литературная модель для обсуждения возрастных изменений костной архитектуры.

Анализ индекса микрофрактуринга (MFI) показал его чувствительность к изменениям в морфологии кости. Более высокие значения MFI в зонах остеопороза свидетельствуют о снижении прочности костной ткани и о возможности использования этого показателя в качестве количественного прогностического критерия риска переломов и нестабильности эндопротеза. В рамках проведенного исследования MFI определяли как плотность микротрещин на единицу площади костной

ткани (мм^2), что позволяет количественно оценивать степень микроповреждений субхондральной зоны.

Данный вывод соответствует результатам современных морфометрических исследований, в которых подчеркивается значимость оценки микроповреждений субхондральной зоны и ее взаимодействия с суставным хрящом в условиях остеоартрита [14, 15].

Повышенные значения MFI могут указывать на снижение механической прочности кости и повышенный риск развития переломов после оперативного вмешательства. В перспективе данный индекс может быть внедрен как дополнительный морфометрический критерий при планировании послеоперационного ведения пациентов, также его можно использовать для обоснования назначения терапии, направленной на ремоделирование. Дополнительные исследования, включающие клиническое наблюдение и сопоставление с данными по фактическим переломам, позволят уточнить прогностическую ценность этого показателя и определить его пороговые значения с высокой чувствительностью и специфичностью.

Таким образом, выявленные структурные особенности подтверждают необходимость учета морфологии субхондральной кости при планировании ортопедического лечения, в том числе тотального эндопротезирования.

ВЫВОДЫ

Исследование позволило выявить, что при остеоартрозе коленного сустава субхондральная костная ткань демонстрирует выраженную морфологическую гетерогенность: в отдельных зонах преобладают признаки остеосклероза, в других — остеопороза. Морфометрический анализ показал, что в участках

Таблица 2. Индекс микрофрактуринга (MFI)

№	Уровень риска	Диапазон MFI	Описание состояния
1	Низкий	< 0,20	Низкое количество микротрещин, высокая структурная устойчивость
2	Средний	0,20–0,25	Умеренное количество микроповреждений, потенциальное снижение прочности
3	Высокий	≥ 0,25	Высокая плотность микротрещин, выраженная хрупкость кости

склероза трабекулы утолщены, а интертрабекулярное пространство сужено, тогда как при остеопорозе наблюдаются истончение трабекул, их фрагментация и расширение интертрабекулярных промежутков. Индекс микрофрактуринга (MFI) оказался достоверно выше в участках разрежения костной ткани, что указывает на

снижение прочности и потенциальную нестабильность кости. Эти данные свидетельствуют о возможности использования морфометрической оценки субхондральной зоны, включая показатель MFI, как прогностического инструмента при планировании ортопедических вмешательств и тотального эндопротезирования.

Литература

- Katz JN, Arant KR, Loeser RF. Diagnosis and Treatment of Hip and Knee Osteoarthritis: A Review. *JAMA*. 2021; 325: 568–78. Available from: <https://doi.org/10.1001/jama.2020.22171>.
- GBD 2019 Diseases and Injuries Collaborators. Global burden of 369 diseases and injuries in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *Lancet Lond Engl*. 2020; 396: 1204–22. Available from: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30925-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30925-9).
- Giorgino R, Albano D, Fusco S, Peretti GM, Mangiavini L, Messina C. Knee Osteoarthritis: Epidemiology, Pathogenesis, and Mesenchymal Stem Cells: What Else Is New? An Update. *Int J Mol Sci*. 2023; 24: 6405. Available from: <https://doi.org/10.3390/ijms24076405>.
- Пилипович А. А., Данилов А. Б. Боль при остеоартрите: патогенез и современные возможности терапии. *Терапия*. 2020; 6-3 (37): 117–27. DOI 10.18565/therapy.2020.3.117-127.
- Jang S, Lee K, Ju JH. Recent Updates of Diagnosis, Pathophysiology, and Treatment on Osteoarthritis of the Knee. *Int J Mol Sci*. 2021; 22: 2619. Available from: <https://doi.org/10.3390/ijms22052619>.
- Donell S. Subchondral bone remodelling in osteoarthritis. *EFORT Open Rev*. 2019; 4: 221–9. Available from: <https://doi.org/10.1302/2058-5241.4.180102>.
- Suri S, Walsh DA. Osteochondral alterations in osteoarthritis. *Bone*. 2012; 51: 204–11. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.bone.2011.10.010>.
- Amir G, Pirie CJ, Rashad S, Revell PA. Remodelling of subchondral bone in osteoarthritis: a histomorphometric study. *J Clin Pathol*. 1992; 45: 990–2. Available from: <https://doi.org/10.1136/jcp.45.11.990>.
- Abramoff B, Caldera FE. Osteoarthritis. *Med Clin North Am*. 2020; 104: 293–311. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.mcna.2019.10.007>.
- Diamond LE, Grant T, Uhlrich SD. Osteoarthritis year in review 2023: Biomechanics. *Osteoarthritis Cartilage*. 2024; 32: 138–47. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.joca.2023.11.015>.
- Chugaev DV, Kravtsov ED, Kornilov NN, Kulyaba TA. Anatomical and Biomechanical Features of the Lateral Compartment of the Knee and Associated Technical Aspects of Unicompartmental Knee Arthroplasty: Lecture. *Traumatol Orthop Russ*. 2023; 29: 144–58. Available from: <https://doi.org/10.17816/2311-2905-2042>.
- Primorac D, Molnar V, Rod E, Jeleč Ž, Čukelj F, Matišić V, et al. Knee Osteoarthritis: A Review of Pathogenesis and State-Of-The-Art Non-Operative Therapeutic Considerations. *Genes*. 2020; 11: 854. Available from: <https://doi.org/10.3390/genes11080854>.
- Green JO, Nagaraja S, Diab T, Vidakovic B, Guldberg RE. Age-related changes in human trabecular bone: Relationship between microstructural stress and strain and damage morphology. *J Biomech*. 2011; 44: 2279–85. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2011.05.034>.
- Zhang S, Li T, Feng Y, Zhang K, Zou J, Weng X, et al. Exercise improves subchondral bone microenvironment through regulating bone-cartilage crosstalk. *Front Endocrinol*. 2023; 14: 1159393. Available from: <https://doi.org/10.3389/fendo.2023.1159393>.
- Román-Blas JA, Castañeda S, Largo R, Herrero-Beaumont G. Subchondral bone remodelling and osteoarthritis. *Arthritis Res Ther*. 2012; 14: A6, ar3713. Available from: <https://doi.org/10.1186/ar3713>.

References

- Katz JN, Arant KR, Loeser RF. Diagnosis and Treatment of Hip and Knee Osteoarthritis: A Review. *JAMA*. 2021; 325: 568–78. Available from: <https://doi.org/10.1001/jama.2020.22171>.
- GBD 2019 Diseases and Injuries Collaborators. Global burden of 369 diseases and injuries in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *Lancet Lond Engl*. 2020; 396: 1204–22. Available from: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30925-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30925-9).
- Giorgino R, Albano D, Fusco S, Peretti GM, Mangiavini L, Messina C. Knee Osteoarthritis: Epidemiology, Pathogenesis, and Mesenchymal Stem Cells: What Else Is New? An Update. *Int J Mol Sci*. 2023; 24: 6405. Available from: <https://doi.org/10.3390/ijms24076405>.
- Pilipovich AA, Danilov AB. Bol' pri osteoartrite: patogenez i sovremennye vozmozhnosti terapii. *Terapija*. 2020; 6-3 (37): 117–27. DOI 10.18565/therapy.2020.3.117-127. Russian.
- Jang S, Lee K, Ju JH. Recent Updates of Diagnosis, Pathophysiology, and Treatment on Osteoarthritis of the Knee. *Int J Mol Sci*. 2021; 22: 2619. Available from: <https://doi.org/10.3390/ijms22052619>.
- Donell S. Subchondral bone remodelling in osteoarthritis. *EFORT Open Rev*. 2019; 4: 221–9. Available from: <https://doi.org/10.1302/2058-5241.4.180102>.
- Suri S, Walsh DA. Osteochondral alterations in osteoarthritis. *Bone*. 2012; 51: 204–11. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.bone.2011.10.010>.
- Amir G, Pirie CJ, Rashad S, Revell PA. Remodelling of subchondral bone in osteoarthritis: a histomorphometric study. *J Clin Pathol*. 1992; 45: 990–2. Available from: <https://doi.org/10.1136/jcp.45.11.990>.
- Abramoff B, Caldera FE. Osteoarthritis. *Med Clin North Am*. 2020; 104: 293–311. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.mcna.2019.10.007>.
- Diamond LE, Grant T, Uhlrich SD. Osteoarthritis year in review 2023: Biomechanics. *Osteoarthritis Cartilage*. 2024; 32: 138–47. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.joca.2023.11.015>.
- Chugaev DV, Kravtsov ED, Kornilov NN, Kulyaba TA. Anatomical and Biomechanical Features of the Lateral Compartment of the Knee and Associated Technical Aspects of Unicompartmental Knee Arthroplasty: Lecture. *Traumatol Orthop Russ*. 2023; 29: 144–58. Available from: <https://doi.org/10.17816/2311-2905-2042>.
- Primorac D, Molnar V, Rod E, Jeleč Ž, Čukelj F, Matišić V, et al. Knee Osteoarthritis: A Review of Pathogenesis and State-Of-The-Art Non-Operative Therapeutic Considerations. *Genes*. 2020; 11: 854. Available from: <https://doi.org/10.3390/genes11080854>.
- Green JO, Nagaraja S, Diab T, Vidakovic B, Guldberg RE. Age-related changes in human trabecular bone: Relationship between microstructural stress and strain and damage morphology. *J Biomech*. 2011; 44: 2279–85. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2011.05.034>.
- Zhang S, Li T, Feng Y, Zhang K, Zou J, Weng X, et al. Exercise improves subchondral bone microenvironment through regulating bone-cartilage crosstalk. *Front Endocrinol*. 2023; 14: 1159393. Available from: <https://doi.org/10.3389/fendo.2023.1159393>.
- Román-Blas JA, Castañeda S, Largo R, Herrero-Beaumont G. Subchondral bone remodelling and osteoarthritis. *Arthritis Res Ther*. 2012; 14: A6, ar3713. Available from: <https://doi.org/10.1186/ar3713>.