

УДК 611.728.3

<https://doi.org/10.52420/umj.23.2.76>

<https://elibrary.ru/OAURFY>



Вариативная анатомия коленного сустава и влияние отдельных ее параметров на топографию передней крестообразной связки

Илья Владимирович Володин^{1,2✉}, Дмитрий Александрович Маланин^{1,2},
Константин Юрьевич Калитин^{1,2}, Ольга Юрьевна Муха¹,
Илья Алексеевич Сучилин^{1,2}, Леонид Леонидович Черезов¹

¹ Волгоградский государственный медицинский университет, Волгоград, Россия

² Волгоградский медицинский научный центр, Волгоград, Россия

✉ volodin_ili@mail.ru

Аннотация

Введение. Анатомические особенности строения коленного сустава имеют значение как потенциальные предикторы различных заболеваний и травм. Однако взаимосвязь между анатомическим расположением передней крестообразной связки и параметрами строения сустава до сих пор остается недостаточно изученной. Наша работа направлена на выявление статистически значимых взаимосвязей между отдельными параметрами коленного сустава и их зависимость с топографией передней крестообразной связки.

Цель работы — определить статистически значимые взаимосвязи между отдельными параметрами сустава и их потенциальное влияние на расположение передней крестообразной связки в суставе по данным магнитно-резонансной томографии.

Материалы и методы. В ходе исследования были проанализированы МРТ-изображения 391 КС у пациентов разного пола. Проведены измерения по 19 параметрам с использованием стандартных инструментов линейных и угловых измерений. Полученные данные подверглись статистической обработке.

Результаты. Анатомическое строение коленного сустава и областей прикрепления передней крестообразной связки демонстрируют не только гендерные и расовые особенности, но и индивидуальные черты конкретного сустава. Выявлено шесть факторов, оказывающих влияние на расположение связки.

Обсуждение. Результаты исследования выявили несостоятельность существующих классификаций строения коленного сустава, подчеркивая необходимость поиска взаимосвязей между параметрами сустава. Факторный анализ измеренных значений позволяет выделить новые системы взаимосвязанных параметров, которые могут не зависеть от пола пациента. Исследование подчеркивает важность разработки новых методов анализа МРТ коленного сустава с использованием многопараметрических моделей.

Заключение. Наше исследование выделяет важные взаимосвязи между параметрами коленного сустава и расположением передней крестообразной связки. Факторы, влияющие на эту динамику, подчеркивают необходимость индивидуализированного подхода к планированию пластики связки. Результаты предоставляют основу для разработки более точных методов анализа и персонализированных стратегий лечения ортопедических заболеваний, повышая эффективность клинической практики.

Ключевые слова: пластика ПКС, морфометрия коленного сустава, МРТ коленного сустава

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии явных и потенциальных конфликтов интересов.

Соответствие принципам этики. В рамках проведенного исследования были строго соблюдены этические нормы, предусмотренные Хельсинкской декларацией. Информированное согласие на использование медицинских данных получено от всех участников исследования. Данные полностью анонимизированы до начала анализа, что исключает возможность идентификации пациентов.

Для цитирования: Вариативная анатомия коленного сустава и влияние отдельных ее параметров на топографию передней крестообразной связки / И. В. Володин, Д. А. Маланин, К. Ю. Калитин [и др.] // Уральский медицинский журнал. 2024. Т. 23, № 2. С. 76–88. DOI: <https://doi.org/10.52420/umj.23.2.76>. EDN: <https://elibrary.ru/OAURFY>.

Variability of Knee Joint Anatomy and the Impact of Its Individual Parameters on the Topography of the Anterior Cruciate Ligament

Ilia V. Volodin^{1,2}✉, Dmitry A. Malanin^{1,2}, Konstantin Y. Kalitin^{1,2},
Olga Y. Mukha¹, Ilia A. Suchilin^{1,2}, Leonid L. Cherezov¹

¹ Volgograd State Medical University, Volgograd, Russia

² Volgograd Science Medical Center, Volgograd, Russia

✉ volodin_ili@mail.ru

Abstract

Introduction. The anatomical features of the knee joint are significant as potential predictors of various diseases and injuries. However, the relationship between the anatomical position of the ACL and the structural parameters of the knee remains insufficiently studied. This work aims to identify statistically significant correlations between individual knee parameters and their association with the topography of the ACL within the joint.

Purpose of the study. To determine statistically significant relationships between individual knee parameters and their potential impact on the positioning of the ACL in the joint based on MRI data.

Materials and methods. The study involved the analysis of MRI images of 391 knee from patients of different sexes. Measurements were taken for 19 parameters using standard tools for linear and angular measurements. The data underwent statistical processing.

Results and discussion. Six factors influencing the positioning of the ACL were identified. The study results challenge the validity of existing knee structure classifications, highlighting the need to explore the relationships between joint parameters. Factor analysis of the measured knee values allows for the identification of new systems of interrelated parameters, including those independent of patient sex. The study emphasizes the importance of developing new MRI analysis methods for the knee using multiparametric models.

Conclusion. Our research highlights important correlations between knee parameters and the positioning of the ACL. Factors affecting this dynamic underscore the need for an individualized approach to planning ACL reconstruction. The results provide a basis for developing more accurate analysis methods and personalized treatment strategies for orthopedic diseases, enhancing the efficacy of clinical practice.

Keywords: ACL reconstruction, knee joint morphometry, knee MRI

Conflicts of interest. The authors declare the absence of obvious or potential conflicts of interest.

Conformity with the principles of ethics. Within the framework of the conducted study, ethical norms as stipulated by the Declaration of Helsinki were strictly adhered to. Informed consent for the use of medical data was obtained from all participants of the study. The data were completely anonymized prior to the commencement of the analysis, precluding the possibility of patient identification.

For citation: Volodin IV, Malanin DA, Kalitin KY, Mukha OY, Suchilin IA, Cherezov LL. Variability of knee joint anatomy and the impact of its individual parameters on the topography of the anterior cruciate ligament. *Ural Medical Journal*. 2024;23 (2):76–88. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.52420/umj.23.2.76>. EDN: <https://elibrary.ru/OAURFY>.

© Володин И. В., Маланин Д. А., Калитин К. Ю., Муха О. Ю., Сучилин И. А., Черезов Л. Л., 2024

© Volodin I. V., Malanin D. A., Kalitin K. Y., Mukha O. Y., Suchilin I. A., Cherezov L. L., 2024

Введение

Строение дистального отдела бедренной (БК) и проксимального отдела большеберцовой костей (ББК) является ключевым фактором в патогенезе многих заболеваний коленного сустава (КС). По данным литературы, форма КС влияет на развитие остеоартрита, надколенниково-бедренных дисфункций, а также может служить предиктором спортивных травм передней крестообразной связки (ПКС) [1, 2]. Накопленные данные многочисленных анатомических и клинических исследований показали значимые половые различия в характеристиках строения КС [3–7]. Однако в исследованиях мало внимания уделено анализу взаимосвязи между отдельными параметрами строения КС и их влиянию на анатомическое

расположение передней крестообразной связки в суставе. Также остается дискуссионным вопрос необходимости учета особенностей строения мыщелков бедренной и большеберцовой костей с точки зрения гендерных и расовых отличий при позиционировании компонентов эндопротеза КС и реконструкции передней крестообразной связки [8–10].

Магнитно-резонансная томография (МРТ) является доступным методом визуализации КС, часто применяется для диагностики и планирования хирургического вмешательства, в особенности пластики ПКС. Наше внимание в этом исследовании обращено на измерение отдельных параметров КС при помощи МРТ и их статистическому анализу, что может дать более целостное представление о факторах и взаимосвязях, влияющих на форму КС и расположение ПКС у конкретного пациента.

Цель работы — определить статистически значимые взаимосвязи между отдельными параметрами КС и их потенциальное влияние на расположение ПКС в суставе.

Материалы и методы

Материалами для исследования послужили МРТ-изображения пациентов с повреждениями менисков коленного сустава, остеоартритом 1–2 стадии, без повреждения ПКС и реконструкцией ПКС в анамнезе. Проанализирован 391 коленный сустав (207 — пациентов женского пола, 184 — мужского). Средний возраст пациентов был $(31,1 \pm 9,8)$ лет.

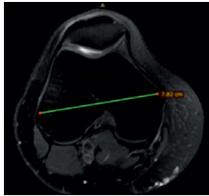
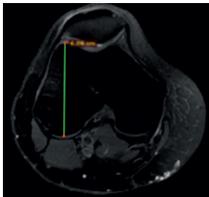
В исследование включали МРТ суставов, которые соответствовали половозрастному критерию, изображения были высокого качества (не менее 1,5 Тл), а также отсутствовали критерии исключения: признаки мультилигаментарных внутрисуставных повреждений, выраженные дегенеративные заболевания и значительные врожденные дисплазии мыщелков коленного сустава.

МРТ-исследования выполнены в одном из диагностических центров Волгограда на томографе GE Signa HDxt 1.5T (General Electric, США) с напряженностью поля 1,5 Тл. Применены T1-взвешенные в продольной релаксации изображения (*англ.* T1-weighted images), T2-взвешенные в поперечной релаксации изображения (*англ.* T2-Weighted Images), PD-изображения с плотностью протонов (*англ.* Proton Density Images), STIR — короткий инверсионный импульс с подавлением жира (*англ.* Short Tau Inversion Recovery).

DICOM-файлы¹ экспортированы в специализированное программное обеспечение для обработки изображений eFilm Workstation 4.2 (Merge Healthcare Inc., США). Два независимых исследователя при помощи стандартных средств линейных и угловых измерений программного обеспечения выполняли измерения по 19 параметрам, согласно протоколу определений изучаемых показателей (табл. 1).

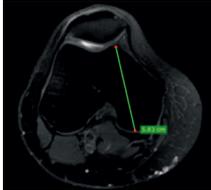
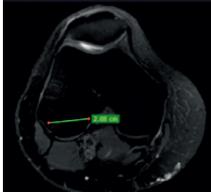
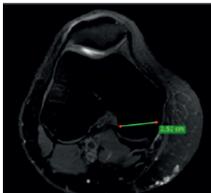
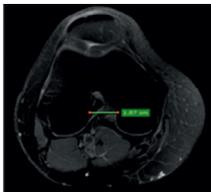
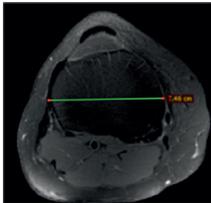
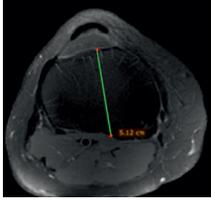
Таблица 1

Параметры измерений дистального отдела бедренной и проксимального отдела большеберцовой костей

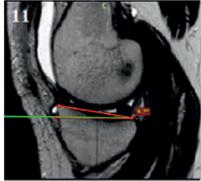
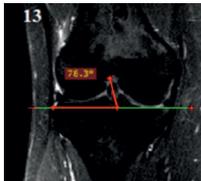
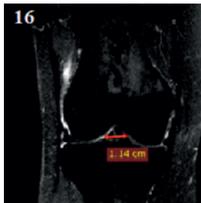
Параметр	Определение	МРТ-изображение
Ширина мыщелков БК на уровне трансэпикондиллярной линии (<i>англ.</i> Intercondylar Width)	Наибольшее расстояние между медиальным и латеральным надмыщелками БК в аксиальной МР-плоскости	
Высота наружного мыщелка БК (<i>англ.</i> Lateral Condylar Height)	Наибольшее расстояние между наиболее выступающими передней и задней частями латерального мыщелка БК в аксиальной МР-плоскости	

¹ DICOM — цифровая визуализация и коммуникации в медицине (*англ.* Digital Imaging and Communications in Medicine).

Продолжение табл. 1

Параметр	Определение	МРТ-изображение
Высота внутреннего мыщелка БК (<i>англ. Medial Condylar Height</i>)	Наибольшее расстояние между наиболее выступающими передней и задней частями медиального мыщелка БК в аксиальной МР-плоскости	
Ширина наружного мыщелка БК (<i>англ. Lateral Trochlear Width</i>)	Расстояние между наиболее удаленными точками латерального мыщелка БК на уровне межмыщелковой ямки БК в аксиальной МР-плоскости	
Ширина внутреннего мыщелка БК (<i>англ. Medial Trochlear Width</i>)	Расстояние между наиболее удаленными точками медиального мыщелка БК на уровне межмыщелковой ямки БК в аксиальной МР-плоскости	
Ширина межмыщелковой ямки БК (<i>англ. Intercondylar Notch Widths</i>)	Наибольшее расстояние между медиальным и латеральным мыщелками БК на середине расстояния перпендикуляра, опущенного от вершины межмыщелковой ямки к горизонтальной плоскости в аксиальной МР-плоскости	
Длина наружного мыщелка БК (<i>англ. Lateral Trochlear Length on the Distal Femur</i>)	Расстояние между передней и задней частями латерального мыщелка БК в проекции линии Блюменсаата сагиттальной плоскости КС	
Ширина плато ББК (<i>англ. Mediolateral Width on the Proximal Tibia</i>)	Максимальное расстояние ширины большеберцового плато в медиолатеральном направлении в аксиальной МР-плоскости	
Глубина плато ББК (<i>англ. Anteroposterior Height on the Proximal Tibia</i>)	Максимальная длина большеберцового плато в переднезаднем направлении, проекционно проходящем через середину межмыщелкового возвышения большеберцовой кости в аксиальной МР-плоскости	

Окончание табл. 1

Параметр	Определение	МРТ-изображение
Форма межмышечковой ямки (вырезки) БК (<i>англ. Shape Types as Described by van Eck, Martins, Vyas, et al. [11]</i>)	Визуально более напоминающая форма межмышечковой вырезки БК; типичные варианты: А, U, W в аксиальной МР-плоскости	
Угол заднего наклона плато ББК (<i>англ. Posterior Tibial Slope Angle</i>)	Угол, образованный плоскостью плато большеберцовой кости и механической осью большеберцовой кости в сагиттальной проекции МРТ	
Угол наклона ПКС относительно оси БК (<i>англ. ACL Tilt Angle Relative to the Femur Axis</i>)	Угол, образованный линией проходящей через середину ПКС в сагиттальной плоскости относительно механической оси БК	
Угол наклона ПКС в коронарной плоскости (<i>англ. ACL Tilt Angle in the Coronal Plane</i>)	Угол, образованный линией проходящей через середину ПКС в коронарной проекции МРТ относительно плато ББК	
Длина ПКС в сагиттальной плоскости (<i>англ. ACL Length in the Sagittal Plane</i>)	Максимально удаленные друг от друга точки визуализации, отражающие длину ПКС в сагиттальной проекции МРТ	
Угол наклона ПКС в сагиттальной плоскости относительно плато ББК (<i>англ. ACL Inclination Angle in the Sagittal Plane Relative to the Tibia Plateau</i>)	Угол, образованный линией, проходящей через середину ПКС в сагиттальной проекции МРТ относительно плато ББК	
Фронтальный размер области прикрепления ПКС на ББК в коронарной плоскости (<i>англ. Frontal Dimension of the Area of ACL Attachment on the Tibia in the Coronal Plane</i>)	Наиболее удаленные точки расстояния места прикрепления ПКС на ББК в коронарной проекции МРТ	
Размер области прикрепления ПКС на ББК в сагиттальной плоскости (<i>англ. Sagittal Size of the Area of ACL Attachment on the Tibia in the Sagittal Plane</i>)	Наиболее удаленные точки расстояния места прикрепления ПКС на ББК в сагиттальной проекции МРТ	

В рамках предварительной подготовки данных выполнена их фильтрация, валидация и нормализация средствами Microsoft Excel 2018. Для последующей статистической обработки данных применялись дисперсионный анализ и метод независимых компонент, выполнялись корреляционный анализ Пирсона, построение модели множественной линейной регрессии, тесты на нормальность распределения с использованием Python-пакета прикладных математических процедур StatsModels 0.13.5 и программного обеспечения GraphPad Prism 9.5.0.

Результаты

На основании проведенных измерений проанализированы полученные по каждому из 19 морфометрических параметров результаты в аспекте гендерных особенностей строения коленного сустава, а также установлены различия в зависимости от формы межмышцелковой ямки.

Средние значения 9 параметров коленного сустава (включая пол) статистически значимо отличались у пациентов с различной формой межмышцелковой ямки ($p < 0,05$). Также найдены значимые половые различия в 14 параметрах, включая форму межмышцелковой ямки ($p < 0,05$). Сравнение значений параметров показало отсутствие выраженной билатеральной асимметрии в строении коленного сустава (табл. 2).

Таблица 2

Сравнительная оценка параметров коленного сустава, полученных по МРТ-изображениям

Показатель	Форма межмышцелковой ямки		Пол	
	А	У	Мужской	Женский
Глубина плато ББК, мм	49,660±0,248	50,880±0,214*	52,350±0,262	48,800±0,167*
Ширина плато ББК, мм	72,610±0,469	75,070±0,363*	79,690±0,216	69,610±0,238*
Угол заднего наклона плато ББК, °	4,830±0,160	4,530±0,104	3,980±0,130	5,180±0,128*
Ширина мыщелков БК на уровне трансэпикондилярной линии, мм	78,160±0,503	81,370±0,387*	85,520±0,262	75,460±0,287*
Ширина медиального мыщелка БК, мм	24,990±0,219	26,110±0,187*	28,310±0,110	23,510±0,128*
Ширина латерального мыщелка БК, мм	23,160±0,246	24,420±0,210*	26,810±0,151	21,630±0,150*
Высота медиального мыщелка БК, мм	60,150±0,396	61,510±0,351*	64,810±0,230	58,160±0,317*
Высота латерального мыщелка БК, мм	65,540±0,456	64,210±0,362*	62,550±0,241	66,440±0,439*
Ширина межмышцелковой ямки, мм	22,440±0,183	22,420±0,162	22,950±0,245	22,070±0,114*
Глубина медиального мыщелка БК, мм	36,000±0,282	36,720±0,206*	38,270±0,177	34,780±0,242*
Глубина латерального мыщелка БК, мм	35,430±0,293	35,500±0,192	35,920±0,183	35,010±0,274*
Угол наклона ПКС относительно оси БК, °	34,250±0,530	33,700±0,244	34,540±0,491	33,540±0,284
Длина ПКС в сагиттальной плоскости, мм	34,020±0,278	33,600±0,214	33,720±0,265	33,770±0,244
Угол наклона ПКС в коронарной плоскости, °	71,870±0,246	71,710±0,283	72,810±0,243	71,230±0,246*
Угол наклона ПКС в сагиттальной плоскости относительно плато ББК, °	53,540±0,280	53,180±0,240	51,950±0,278	54,450±0,270*
Фронтальный размер области прикрепления ПКС на ББК в коронарной плоскости, мм	8,560±0,120	8,760±0,104	8,830±0,094	8,510±0,113
Сагиттальный размер области прикрепления ПКС на ББК в сагиттальной плоскости, мм	9,410±0,165	9,290±0,123	9,470±0,098	9,210±0,154

Примечание: * статистически значимые различия между группами по основанию формы межмышцелковой ямки или пола ± SEM (стандартная ошибка среднего; англ. Standard Error of the Mean) ($p < 0,05$).

Для изучения взаимозависимости исследуемых переменных и степени их участия в системной организации коленного сустава проведен корреляционный анализ. Результаты представлены в корреляционной матрице (табл. 3), где пары показателей в соответствии с абсолютной величиной коэффициента ассоциации, взятого по модулю, распределены по диапазонам сильных значений ($>0,8$; $p < 0,05$), средних значений ($0,5-0,8$; $p < 0,05$), слабых значений ($0,3-0,5$; $p < 0,05$) и очень слабых значений ($0,2-0,3$; $p < 0,05$).

Выявлены множественные положительные и отрицательные корреляционные связи для большинства параметров. Наиболее многочисленны корреляционные взаимодействия установлены в отношении признака половой принадлежности. При этом форма и ширина межмышцелковой ямки БК, глубина латерального мыщелка БК, угол наклона ПКС относительно оси БК, сторона, длина ПКС в сагиттальной плоскости, а также фронтальный и сагиттальный размеры области прикрепления ПКС на ББК в сагиттальной плоскости не образуют статистически значимых корреляций.

Таблица 3

Матрица корреляций между параметрами (П) коленного сустава

П	П1	П2	П3	П4	П5	П6	П7	П8	П9	П10	П11	П12	П13	П14	П15	П16	П17	П18	П19	П20
П1	1	0,02	0,50	0,84	-0,31	0,81	0,84	0,81	0,66	-0,4	0,16	0,15	0,51	0,12	0,05	-0,06	0,24	-0,30	0,12	0,07
П2	0,02	1	-0,01	0,09	0,05	0,08	0,03	0,06	-0,09	0,04	-0,02	0,07	-0,06	-0,08	-0,05	-0,02	0,03	0,04	0,14	0,09
П3	0,50	-0,01	1	0,53	-0,08	0,40	0,42	0,42	0,40	0,05	0,11	0,06	0,26	0,16	0,04	0,09	0,19	-0,17	0,07	0,01
П4	0,84	0,09	0,53	1	-0,27	0,75	0,76	0,76	0,57	-0,36	0,11	0,15	0,42	0,10	0	0,01	0,18	-0,33	0,12	0,08
П5	-0,31	0,05	-0,08	-0,27	1	-0,18	-0,29	-0,26	-0,25	0,22	-0,08	0,02	-0,23	-0,06	0,15	0,02	-0,10	0,02	-0,04	0,05
П6	0,81	0,08	0,4	0,75	-0,18	1	0,72	0,71	0,57	-0,28	0,18	0,19	0,45	0,16	0,04	-0,01	0,24	-0,26	0,16	0,03
П7	0,84	0,03	0,42	0,76	-0,29	0,72	1	0,84	0,61	-0,39	0,12	0,12	0,41	0,02	-0,01	-0,06	0,15	-0,31	0,11	0,04
П8	0,81	0,06	0,42	0,76	-0,26	0,71	0,84	1	0,57	-0,46	0,14	0,14	0,43	0,02	0,06	-0,03	0,20	-0,34	0,15	0,02
П9	0,66	-0,09	0,40	0,57	-0,25	0,57	0,61	0,57	1	-0,22	0,09	0,12	0,44	0,08	-0,04	-0,04	0,12	-0,20	0,04	-0,04
П10	-0,40	0,04	0,05	-0,36	0,22	-0,28	-0,39	-0,46	-0,22	1	-0,11	0,07	-0,19	0,20	0,03	0,13	0,09	0,25	0,04	0,16
П11	0,16	-0,02	0,11	0,11	-0,08	0,18	0,12	0,14	0,09	-0,11	1	-0,04	0,10	-0,01	-0,10	-0,11	0,04	0,01	0,04	0,02
П12	0,15	0,07	0,06	0,15	0,02	0,19	0,12	0,14	0,12	0,07	-0,04	1	0,03	0,1	0,13	0,03	0,11	-0,07	0,07	0,10
П13	0,51	-0,06	0,26	0,42	-0,23	0,45	0,41	0,43	0,44	-0,19	0,10	0,03	1	0,19	-0,03	-0,07	0,20	-0,14	0,04	-0,01
П14	0,12	-0,08	0,16	0,10	-0,06	0,16	0,02	0,02	0,08	0,20	-0,01	0,10	0,19	1	0,03	0,07	0,23	0,02	-0,10	0,10
П15	0,05	-0,05	0,04	0	0,15	0,04	-0,01	0,06	-0,04	0,03	-0,10	0,13	-0,03	0,03	1	0,09	0	-0,1	0,01	-0,01
П16	-0,06	-0,02	0,09	0,01	0,02	-0,01	-0,06	-0,03	-0,04	0,13	-0,11	0,03	-0,07	0,07	0,09	1	0,06	-0,03	0,10	-0,12
П17	0,24	0,03	0,19	0,18	-0,10	0,24	0,15	0,20	0,12	0,09	0,04	0,11	0,20	0,23	0	0,06	1	-0,02	0,05	0,09
П18	-0,30	0,04	-0,17	-0,33	0,02	-0,26	-0,31	-0,34	-0,20	0,25	0,01	-0,07	-0,14	0,02	-0,10	-0,03	-0,02	1	-0,07	0,02
П19	0,12	0,14	0,07	0,12	-0,04	0,16	0,11	0,15	0,04	0,04	0,04	0,07	0,04	-0,10	0,01	0,10	0,05	-0,07	1	0,05
П20	0,07	0,09	0,01	0,08	0,05	0,03	0,04	0,02	-0,04	0,16	0,02	0,10	-0,01	0,10	-0,01	-0,12	0,09	0,02	0,05	1

Примечания. П1 — пол (жен. — 0, муж. — 1); П2 — нижняя конечность (левая — 0; правая — 1); П3 — глубина плато ББК; П4 — ширина плато ББК; П5 — угол заднего наклона плато ББК; П6 — ширина мышечков БК на уровне трансэпикондлярной линии; П7 — ширина медиального мышечка БК; П8 — ширина латерального мышечка БК; П9 — высота медиального мышечка БК; П10 — высота латерального мышечка БК; П11 — форма межмышечковой ямки БК (А — 0; U — 1); П12 — ширина межмышечковой ямки; П13 — глубина медиального мышечка БК; П14 — глубина латерального мышечка БК; П15 — угол наклона ПКС относительно оси БК; П16 — длина ПКС в сагиттальной плоскости; П17 — угол наклона ПКС в коронарной плоскости; П18 — угол наклона ПКС в сагиттальной плоскости относительно плато ББК; П19 — фронтальный размер области прикрепления ПКС на ББК в коронарной плоскости; П20 — сагиттальный размер области прикрепления ПКС на ББК в сагиттальной плоскости. Выделенные ячейки показывают степень корреляции параметров от более интенсивного к менее интенсивному цвету.

С учетом наличия мультиколлинеарности между признаками дальнейший факторный анализ выполнялся методом главных компонент для сокращения числа переменных на основе их классификации и определения структуры взаимосвязей между ними. Влияние главных компонент, собственные значения которых численно равны дисперсии соответствующих главных факторов, на динамику целевых и базовых факторов представлено на рисунке. Выделено 6 первых наиболее значимых компонент, которые объясняют 61,16 % вариативности.

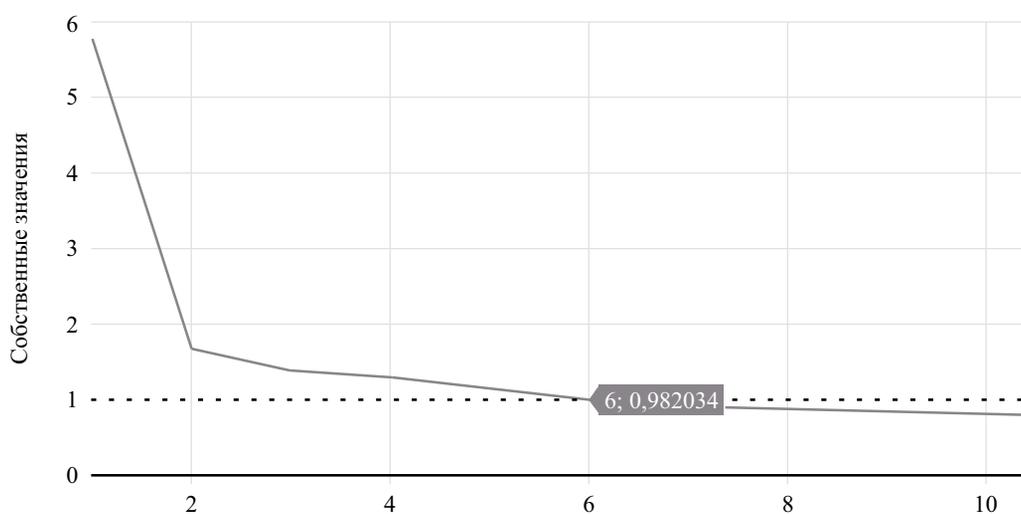


Рис. Динамика собственных значений главных компонент

С помощью метода вращения Varimax первичных факторных структур получены и интерпретированы простые факторные структуры на основе метрических параметров коленного сустава (табл. 4). Целью вращения является получение простой структуры, которой соответствует большое значение нагрузки каждой переменной только по одному фактору и малое по всем остальным факторам. Нагрузка в этом случае отражает связь между переменной и фактором, являясь подобием коэффициента корреляции. Значение нагрузки лежит в пределах $(-1; 1)$. После поворота осей переменные оказываются вблизи осей, что соответствует максимальной нагрузке каждой переменной только по одному фактору. Такое исследование позволило выявить латентные интегративные характеристики сустава, обусловленные единым фактором.

Первый фактор с наибольшей общностью (28,89 % от общей дисперсии) объединяет гендерно-детерминированные параметры коленного сустава. Второй по значимости фактор с 8,35 %-м вкладом в общую дисперсию включал пять составляющих: глубина плато большеберцовой кости, высота и глубина латерального мыщелка бедренной кости, что влияло на угол наклона ПКС в сагиттальной и корональной проекции. С третьего по шестой факторы представлены в табл. 4.

Таблица 4

Величины общности и распределение факторной нагрузки после ортогонального вращения (Varimax)

Признак	Общности	Факторная нагрузка (Varimax)					
		1	2	3	4	5	6
Пол (жен. — 0; муж. — 1)	0,89	0,94	0,01	-0,01	-0,01	0,04	0,02
Глубина плато ББК	0,58	0,55	0,31	0,24	0,02	-0,17	0,30
Ширина плато ББК	0,79	0,89	0	0,03	0,08	-0,01	0
Угол заднего наклона плато ББК	0,57	-0,34	-0,04	0,65	0,02	0,12	0,13
Ширина мыщелков БК на уровне трансэпикондиллярной линии	0,74	0,85	0,07	0,06	0,08	0,03	0,04
Ширина медиального мыщелка БК	0,80	0,89	-0,12	-0,03	0,03	0,02	0
Ширина латерального мыщелка БК	0,81	0,89	-0,14	0,03	0,05	-0,01	-0,02

Окончание табл. 4

Признак	Общности	Факторная нагрузка (Varimax)					
		1	2	3	4	5	6
Высота медиального мыщелка БК	0,56	0,73	0,05	-0,09	-0,14	-0,07	0,05
Высота латерального мыщелка БК	0,67	-0,43	0,63	0,23	0,17	0,01	0,09
Форма межмыщелковой ямки БК (A — 0; U — 1)	0,68	0,17	-0,02	-0,02	0,01	0,21	0,78
Ширина межмыщелковой ямки	0,43	0,20	0,19	0,29	0,17	0,20	-0,45
Глубина медиального мыщелка БК	0,45	0,58	0,19	-0,21	-0,20	0	0,02
Глубина латерального мыщелка БК	0,59	0,13	0,69	0	-0,29	0,05	-0,11
Угол наклона ПКС относительно оси БК	0,54	0,04	-0,04	0,66	-0,17	-0,11	-0,23
Длина ПКС в сагиттальной плоскости	0,67	-0,05	0,25	0,16	0,23	-0,72	-0,06
Угол наклона ПКС в корональной плоскости	0,40	0,26	0,56	-0,08	0,08	0,02	-0,08
Угол наклона ПКС в сагиттальной плоскости относительно плато ББК	0,40	-0,39	0,30	-0,33	0,09	0,15	0,12
Фронтальный размер области крепления ПКС на ББК в корональной плоскости	0,55	0,15	-0,01	0,07	0,69	-0,19	0,13
Сагиттальный размер области крепления ПКС на ББК в сагиттальной плоскости	0,55	0,05	0,24	0,19	0,18	0,65	-0,04

Примечание: выделенные ячейки показывают степень корреляции параметров от более интенсивного к менее интенсивному зеленому цвету.

Обсуждение

На основании проведенного исследования и анализа данных литературы мы пришли к выводу, что возможности типирования коленных суставов по каким-либо критериям весьма ограничены. Кроме того, многими авторами при разработке классификаций были выбраны структурные параметры, позволяющие наиболее точно дифференцировать суставы по основанию пола и расы, при этом упускается из внимания клиническая значимость этих параметров, а также различия, которые по ним фиксируются [12–14].

Нами выбран метод МРТ для измерения отдельных параметров КС, т. к. он является доступным и часто применяемым для диагностики патологий сустава и планирования хирургических вмешательств на КС. С помощью МРТ в рутинной практике перед реконструкцией ПКС хирург может оценить сопутствующие повреждения менисков, хряща и связок КС, выраженность дегенеративных изменений сустава, а также толщину и состояние зоны забора трансплантата связки [15, 16]. Немаловажную роль перед хирургическим вмешательством имеет оценка состояния костной ткани, а также размеров мыщелков БК и ББК для планирования формирования длины каналов. Однако с помощью МРТ КС невозможно достоверно оценить область прикрепления ПКС, в особенности бедренного прикрепления связки, и спланировать центр формирования каналов для анатомического размещения трансплантата.

Гипотезой нашего исследования был поиск значимых взаимосвязей между отдельными параметрами КС и их потенциальным влиянием на расположение областей прикрепления ПКС, что в дальнейшем может быть применено для построения многопараметрической математической модели при предоперационном планировании реконструкции связочного аппарата КС.

Статистическая обработка 19 параметров МРТ в 391 КС, включенном в исследование, которые соответствовали критериям включения и исключения, позволила сформировать количественную базу данных. Однако благодаря сокращению числа переменных вместо исходного набора переменных появилась возможность анализировать данные по выделенным факторам, число которых значительно меньше исходного числа взаимосвязанных переменных.

В ходе факторного анализа мы исходили из предположения о том, что каждый из исходных признаков может быть представлен в виде суммы линейной комбинации небольшого числа латентных (скрытых) общих факторов и характерных факторов. При этом считается, что каждый общий фактор имеет существенное значение для анализа большинства исходных признаков. В то же время изменения в характерном факторе воздействуют главным образом на значения только соответствующего признака. Иными словами, характерный фактор отражает ту специфику признака, которая не может быть выражена через общие факторы.

Исходя из полученных результатов нашего исследования, к признакам, связанным с полом, можно отнести: глубину и ширину плато ББК, угол заднего наклона плато ББК, ширину мыщелков БК на уровне трансэпикондиллярной линии, ширину медиального мыщелка БК, ширину латерального мыщелка БК, высоту медиального мыщелка БК, а также высоту латерального мыщелка БК.

Гендерные особенности строения КС, выявленные нами, соотносятся с ранее проведенными исследованиями и несколько дополняют их. Так, по данным ряда исследований, разница в размерах мыщелков БК между мужским и женским коленным суставом была продемонстрирована в работах М. Махфуза и др. (англ. M. Mahfouz et al.), Дж. С. Эверхарта и др. (англ. J. S. Everhart et al.) [12, 13]. Также показано, что женщины, по сравнению с мужчинами, имеют больший задний наклон плато ББК, что предрасполагает к более высокому риску бесконтактной травмы ПКС [17, 18]. Мы также подтвердили разницу в глубине и ширине плато ББК между мужчинами и женщинами [19, 20]. Многие авторы также отмечают влияние некоторых геометрических факторов КС на риск разрыва ПКС [21–23].

Однако анатомическое строение коленного сустава и областей прикрепления ПКС имеет не столько гендерные и расовые особенности, которые отмечены в большинстве исследований [24–26], сколько они носят персонифицированный характер конкретного сустава, что отражается во взаимосвязи отдельных параметров.

При анализе остальных факторов мы определили, что второй фактор (табл. 4) объединяет такие показатели, как высота и ширина латерального мыщелка, угол наклона ПКС в корональной и сагиттальной плоскостях относительно плато ББК, глубина плато ББК, которые в большей или меньшей степени скоррелированы между собой. Выявленные корреляции между параметрами этого фактора могут влиять на расположение ПКС в фронтальной и сагиттальной плоскости, поскольку выявлена зависимость размеров наружного мыщелка БК и угла наклона ПКС.

Третий фактор обобщает такие признаки, как угол наклона плато ББК и углы наклона ПКС относительно оси БК и ББК. Установлена зависимость этих параметров друг от друга, что также говорит о вероятной связи расположения центра ПКС от анатомической особенности заднего угла наклона ББК.

Четвертый фактор является характерным для фронтального размера области крепления ПКС на ББК в корональной плоскости.

Пятый фактор показывает корреляцию между длиной ПКС и размером области прикрепления ПКС к ББК.

Шестой фактор показывает взаимосвязь между глубиной плато ББК с шириной и формой межмыщелковой ямки БК.

Необходимо добавить, что полученная модель плохо объясняет такие параметры, как ширина межмыщелковой ямки, глубина медиального мыщелка БК, угол наклона ПКС в корональной плоскости и сагиттальной плоскости относительно плато ББК, которые имеют общность менее 50 %.

Таким образом, большая часть параметров образует единую систему взаимосвязанных признаков. Прочие признаки выходят за рамки этой системы и обусловлены отдельными характерными факторами, которые могут иметь значение при хирургических вмешательствах, связанных с КС и реконструкцией связочного аппарата.

Вместе с этим введение дополнительных параметров, в т. ч. не имеющих корреляции с полом, может быть полезным для построения многопараметрической модели, позволяющей прогнозировать клинически значимые исходы или значения тех параметров, которые не могут быть определены прямым способом, что мы после обработки представим в следующих публикациях.

Заключение

Несостоятельность предложенных классификаций строения КС диктует необходимость поиска взаимосвязанных параметров сустава, которые могут дать больше клинически значимых данных.

Факторный анализ позволяет выделить новые системы взаимосвязанных параметров, в т. ч. не связанных с полом.

Дополнительные параметры могут быть использованы для построения многопараметрической модели анализа МРТ КС и смогут помочь при планировании пластики ПКС.

Список литературы | References

1. Hasoon J, Al-Dadah O. Knee anatomic geometry accurately predicts risk of anterior cruciate ligament rupture. *Acta Radiologica*. 2023;64(5):1904–1911. DOI: <https://doi.org/10.1177/02841851231152329>.
2. Schneider A, Si-Mohamed S, Magnussen RA, Lustig S, Neyret P, Servien E. Tibiofemoral joint congruence is lower in females with ACL injuries than males with ACL injuries. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. 2018;26:1375–1383. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00167-017-4756-7>.
3. Levins JG, Sturnick DR, Argentieri EC, Gardner-Morse M, Vacek PM, Desarno MJ, et al. Geometric risk factors associated with noncontact anterior cruciate ligament graft rupture. *The American Journal of Sports Medicine*. 2016;44(10):2537–2545. DOI: <https://doi.org/10.1177/0363546516657525>.
4. Beaulieu ML, Nowak EK, Beynon BD, Ashton-Miller JA, Sturnick DR, Wojtys EM. Clinical-grade MRI-based methods to identify combined anatomic factors that predict ACL injury risk in male and female athletes. *The American Journal of Sports Medicine*. 2021;49(10):2615–2623. DOI: <https://doi.org/10.1177/03635465211024249>.
5. Malanin DA, Volodin IV, Suchilin IA, Demeschenko MV. Gender differences of the ACL insertion sites. *Traumatology and Orthopaedics in Russia*. 2020;26(4):80–92. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21823/2311-2905-2020-26-4-80-92>.
6. Li M, Ji G, Fan L, Fan CY, Lin W, Yang GM, et al. Assessment of patellar morphology in trochlear dysplasia on computed tomography scans. *Orthopaedic Surgery*. 2021;13(2):458–465. DOI: <https://doi.org/10.1111/os.12825>.
7. Ellison TM, Flagstaff I, Johnson AE. Sexual dimorphisms in anterior cruciate ligament injury: A current concepts review. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*. 2021;9(12):23259671211025304. DOI: <https://doi.org/10.1177/23259671211025304>.
8. Patel AP, Gronbeck C, Chambers M, Harrington MA, Halawi MJ. Gender and total joint arthroplasty: Variable outcomes by procedure type. *Arthroplasty Today*. 2020;6(3):517–520. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.artd.2020.06.012>.
9. Asseln M, Hänisch C, Schick F, Radermacher K. Gender differences in knee morphology and the prospects for implant design in total knee replacement. *The Knee*. 2018;25(4):545–558. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.knee.2018.04.005>.
10. Tan SH, Lau BP, Khin LW, Lingaraj K. The importance of patient sex in the outcomes of anterior cruciate ligament reconstructions: A systematic review and meta-analysis. *The American Journal of Sports Medicine*. 2016;44(1):242–254. DOI: <https://doi.org/10.1177/0363546515573008>.
11. Hirtler L, Kainberger F, Röhrich S. The intercondylar fossa — A narrative review. *Clinical Anatomy*. 2022;35(1):2–14. DOI: <https://doi.org/10.1002/ca.23773>.
12. Mahfouz M, Abdel Fatah EE, Bowers LS, Scuderi G. Three-dimensional morphology of the knee reveals ethnic differences. *Clinical Orthopaedics and Related Research*. 2012;470:172–185. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11999-011-2089-2>.
13. Everhart JS, Chaudhari AM, Flanigan DC. Creation of a simple distal femur morphology classification system. *Journal of Orthopaedic Research*. 2016;34:924–931. DOI: <https://doi.org/10.1002/jor.23102>.
14. Gillespie RJ, Levine A, Fitzgerald SJ, Kolaczko J, DeMaio M, Marcus RE, et al. Gender differences in the anatomy of the distal femur. *The Journal of Bone & Joint Surgery British Volume*. 2011;93:357–363. DOI: <https://doi.org/10.1302/0301-620X.93B3.24708>.
15. Hanna A, Hollnagel K, Whitmer K, John C, Johnson B, Godin J, et al. Reliability of magnetic resonance imaging prediction of anterior cruciate ligament autograft size and comparison of radiologist and orthopaedic surgeon predictions. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*. 2019;7(12):2325967119889593. DOI: <https://doi.org/10.1177/2325967119889593>.
16. Camarda L, Grassedonio E, Albano D, Galia M, Midiri M, D'Arienzo M. MRI evaluation to predict tendon size for knee ligament reconstruction. *Muscles, Ligaments and Tendons Journal*. 2018;7(3):478–484. DOI: <https://doi.org/10.11138/mltj/2017.7.3.478>.
17. Li K, Cavaignac E, Xu W, Cheng Q, Telmon N, Huang W. Morphometric evaluation of the knee in Chinese population reveals sexual dimorphism and age-related differences. *International Orthopaedics*. 2018;42(10):2349–2356. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00264-018-3826-x>.
18. Hasoon J, Al-Dadah O. Knee anatomic geometry accurately predicts risk of anterior cruciate ligament rupture. *Acta Radiologica*. 2023;64(5):1904–1911. DOI: <https://doi.org/10.1177/02841851231152329>.
19. Barnum MS, Boyd ED, Vacek P, Slauterbeck JR, Beynon BD. Association of geometric characteristics of knee anatomy (alpha angle and intercondylar notch type) with noncontact ACL injury. *The American Journal of Sports Medicine*. 2021;49(10):2624–2630. DOI: <https://doi.org/10.1177/03635465211023750>.
20. Maijanen H, Junno JA, Keisu A, Niinimäki J, Lehenkari P, Oura P. Sex estimation from knee breadth dimensions in a Finnish population. *Legal Medicine*. 2021;51:101873. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.legalmed.2021.101873>.
21. Gültekin MZ, Dinçel YM, Keskin Z, Arslan S, Yıldırım A. Morphometric risk factors effects on anterior cruciate ligament injury. *Joint Diseases and Related Surgery*. 2023;34(1):130–137. DOI: <https://doi.org/10.52312/jdrs.2023.910>.

22. Lansdown D, Ma CB. The influence of tibial and femoral bone morphology on knee kinematics in the anterior cruciate ligament injured knee. *Clinics in Sports Medicine*. 2018;37(1):127–136. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csm.2017.07.012>.
23. Shen L, Jin ZG, Dong QR, Li LB. Anatomical risk factors of anterior cruciate ligament injury. *Chinese Medical Journal*. 2018;131 (24):2960–2967. DOI: <https://doi.org/10.4103/0366-6999.247207>.
24. Dimitriou D, Wang Z, Zou D, Helmy N, Tsai TY. Do sex-specific differences exist in ACL attachment location? An MRI-based 3-dimensional topographic analysis. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*. 2020;8(11):2325967120964477. DOI: <https://doi.org/10.1177/2325967120964477>.
25. Hosseinzadeh S, Kiapour AM. Sex differences in anatomic features linked to anterior cruciate ligament injuries during skeletal growth and maturation. *The American Journal of Sports Medicine*. 2020;48(9):2205–2212. DOI: <https://doi.org/10.1177/0363546520931831>.
26. Devana SK, Solorzano C, Nwachukwu B, Jones KJ. Disparities in ACL reconstruction: the Influence of gender and race on incidence, treatment, and outcomes. *Current Reviews in Musculoskeletal Medicine*. 2022;15(1):1–9. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12178-021-09736-1>.

Информация об авторах

Илья Владимирович Володин — ассистент кафедры травматологии, ортопедии и ВПХ, Волгоградский государственный медицинский университет, Волгоград, Россия; младший научный сотрудник лаборатории клинической и экспериментальной ортопедии, Волгоградский медицинский научный центр, Волгоград, Россия.

E-mail: volodin_ili@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8037-1674>

Дмитрий Александрович Маланин — доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой травматологии, ортопедии и ВПХ, Волгоградский государственный медицинский университет, Волгоград, Россия; заведующий лабораторией клинической и экспериментальной ортопедии, Волгоградский медицинский научный центр, Волгоград, Россия.

E-mail: malanin67@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7507-0570>

Константин Юрьевич Калитин — кандидат медицинских наук, доцент, доцент кафедры фармакологии и биоинформатики, Волгоградский государственный медицинский университет, Волгоград, Россия; научный сотрудник лаборатории экспериментальной фармакологии, Волгоградский медицинский научный центр, Волгоград, Россия.

E-mail: kkonst8@ya.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0079-853X>

Ольга Юрьевна Муха — лаборант кафедры фармакологии и биоинформатики, Волгоградский государственный медицинский университет, Волгоград, Россия.

E-mail: olay.myha14@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0429-905X>

Илья Алексеевич Сучилин — кандидат медицинских наук, доцент кафедры травматологии, ортопедии и ВПХ, Волгоградский государственный медицинский университет, Волгоград, Россия; научный сотрудник лаборатории экспериментальной фармакологии, Волгоградский медицинский научный центр, Волгоград, Россия.

E-mail: omnio@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7375-5365>

Леонид Леонидович Черезов — кандидат медицинских наук, доцент кафедры травматологии, ортопедии и ВПХ, Волгоградский государственный медицинский университет, Волгоград, Россия.

E-mail: lchrzv@rambler.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7375-5367>

Information about the authors

Ilya V. Volodin — Assistant of the Department of Traumatology, Orthopedics and Military Field Surgery, Volgograd State Medical University, Volgograd, Russia; Junior Researcher of the Laboratory of Clinical and Experimental Orthopedics, Volgograd Science Medical Center, Volgograd, Russia.

E-mail: volodin_ili@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8037-1674>

Dmitry A. Malanin — Doctor of Sciences (Medicine), Professor, Head of the Department of Traumatology, Orthopedics and Military Field Surgery, Volgograd State Medical University, Volgograd, Russia; Head of the Laboratory of Clinical and Experimental Orthopedics, Volgograd Science Medical Center, Volgograd, Russia.

E-mail: malanin67@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7507-0570>

Konstantin Y. Kalitin — Candidate of Sciences (Medicine), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Pharmacology and Bioinformatics, Volgograd State Medical University, Volgograd, Russia; Researcher of the Laboratory of Experimental Pharmacology, Volgograd Science Medical Center, Volgograd, Russia.

E-mail: kkonst8@ya.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0079-853X>

Olga Y. Mukha — Laboratory Technician of the Department of Pharmacology and Bioinformatics, Volgograd State Medical University, Volgograd, Russia.

E-mail: olay.myha14@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0429-905X>

Iliia A. Suchilin — Candidate of Sciences (Medicine), Associate Professor of the Department Traumatology, Orthopedics and Military Field Surgery, Volgograd State Medical University, Volgograd, Russia; Researcher of the Laboratory of Clinical and Experimental Orthopedics, Volgograd Science Medical Center, Volgograd, Russia.

E-mail: omnio@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7375-5365>

Leonid L. Cherezov — Candidate of Sciences (Medicine), Associate Professor of the Department of Traumatology, Orthopedics and Military Field Surgery, Volgograd State Medical University, Volgograd, Russia.

E-mail: lchrzv@rambler.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7375-5367>

Рукопись получена: 14 ноября 2023. Одобрена после рецензирования: 29 ноября 2023. Принята к публикации: 13 марта 2024.

Received: 14 November 2023. Revised: 29 November 2023. Accepted: 13 March 2024.