

АНАТОМИЯ И БИОМЕХАНИКА МЕНИСКОВ: КЛИНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Хурамшина А.Р., Рыбалко Д.Ю.

Башкирский государственный медицинский университет, Уфа, e-mail: kirillkuznetsov@aol.com

Мениски представляют собой волокнисто-хрящевые структуры в форме полумесяца с клиновидными поперечными сечениями, которые увеличивают углубление плато большеберцовой кости, передают нагрузку через сустав, обеспечивают амортизацию и повышают стабильность коленного сустава. Любой дефицит мениска может привести к ускоренным дегенеративным изменениям, а резекция всего лишь 10% мениска может способствовать развитию хондральных поражений, а также снижению субъективных и объективных показателей клинического исхода. Цель исследования - обобщить ключевые клинически значимые анатомические и биомеханические принципы медиального и латерального менисков. В статье подробно рассматривается анатомия менисков и принцип их функционирования с клинической точки зрения. Свойства распределения нагрузки мениска обеспечивают большую площадь контакта и снижение контактного давления в большеберцово-бедренном суставе. Это особенно важно в латеральном отделе, где 70% нагрузки передается на латеральный мениск, по сравнению с 50% в медиальном отделе, из-за большей роли латерального мениска в обеспечении конгруэнтности сустава. Разрывы менисков могут вызвать серьезные функциональные, биомеханические и кинематические нарушения в коленном суставе, приводящие к ускоренной дегенерации суставного хряща. Глубокое понимание количественных и качественных взаимосвязей мениска и его фиксирующего аппарата с ключевыми артроскопическими ориентирами позволит хирургу анатомически устранить патологию мениска и восстановить естественную биомеханику сустава.

Ключевые слова: мениски, коленный сустав, анатомия, биомеханика, хирургия.

ANATOMY AND BIOMECHANICS OF MENISCI: CLINICAL ASPECTS

Khuramshina A.R., Rybalko D.Yu.

Bashkir State Medical University, Ufa, e-mail: kirillkuznetsov@aol.com

Menisci are fibrous-cartilaginous structures in the shape of a crescent with wedge-shaped cross sections that increase the deepening of the tibial plateau, transfer the load through the joint, provide cushioning and increase the stability of the knee joint. Any meniscus deficiency can lead to accelerated degenerative changes, and resection of only 10% of the meniscus can contribute to the development of chondral lesions, as well as a decrease in subjective and objective indicators of clinical outcome. The aim of the study is to summarize the key clinically significant anatomical and biomechanical principles of medial and lateral menisci. The article discusses in detail the anatomy of menisci and the principle of their formation from a clinical point of view. The load distribution properties of the meniscus provide a large contact area and a reduction in contact pressure in the tibial-femoral joint. This is especially important in the lateral region, where 70% of the load is transferred to the lateral meniscus, compared to 50% in the medial region, due to the greater role of the lateral meniscus in ensuring joint congruence. Meniscal ruptures can cause serious functional, biomechanical and kinematic disorders in the knee joint, leading to accelerated degeneration of articular cartilage. A deep understanding of the quantitative and qualitative relationships of the meniscus and its fixing apparatus with key arthroscopic landmarks will allow the surgeon to anatomically eliminate the pathology of the meniscus and restore the natural biomechanics of the joint.

Keywords: menisci, knee joint, anatomy, biomechanics, surgery.

Мениски представляют собой волокнисто-хрящевые структуры в форме полумесяца с клиновидными поперечными сечениями, которые увеличивают углубление плато большеберцовой кости, передают нагрузку через сустав, обеспечивают амортизацию и повышают стабильность коленного сустава [1]. Мениски имеют вогнутую верхнюю поверхность, чтобы соответствовать выпуклой поверхности мыщелка бедренной кости, а также плоскую нижнюю поверхность, чтобы соответствовать относительно плоскому плато

большеберцовой кости [2]. Клиновидная форма мениска позволяет ему оптимизировать передачу осевых нагрузок через сустав и минимизировать пиковые контактные давления на поверхности суставного хряща за счет улучшения площади контакта сустава между плоским плато большеберцовой кости и округлым мыщелком бедренной кости [2]. Кроме того, его эластичность позволяет ему функционировать в качестве амортизатора внутри сустава [2]. В результате любой дефицит мениска может привести к ускоренным дегенеративным изменениям, а резекция всего лишь 10% мениска может способствовать развитию хондральных поражений, а также снижению субъективных и объективных показателей клинического исхода [2]. В дополнение к своей роли в минимизации контактного давления на суставной хрящ мениски также выполняют функцию вторичных стабилизаторов коленного сустава. Медиальный мениск в основном способствует передне-заднему перемещению, в то время как латеральный мениск помогает противостоять вращательному движению [2].

Цель исследования – обобщить ключевые клинически значимые анатомические и биомеханические принципы медиального и латерального менисков.

Анатомические данные

Медиальный мениск имеет размер приблизительно 45,7 мм в длину и 27,4 мм в ширину [1]. Его можно разделить на пять зон [3], которые включают в себя переднее прикрепление корня (зона 1), переднемедиальную зону между задней границей переднего корня и передней границей поверхностной медиальной коллатеральной связки (зоны 2А и 2В), участок мениска, который прилегает к поверхностной медиальной коллатеральной связке (зона 3), задний рог (зона 4) и задний корень (зона 5). С клинической точки зрения следует отметить, что зона 4 является наиболее распространенным местом разрыва мениска и, соответственно, зоной, где чаще всего выполняется его восстановление [2; 4]. Исследования показали, что медиальный мениск занимает от 51 до 74% площади поверхности медиального плато большеберцовой кости [5]. В исследовании К. Влоескер и соавт. была предпринята попытка изучить это свойство с помощью МРТ. Авторы обнаружили, что медиальный мениск покрывает 50% медиального плато большеберцовой кости [6].

Латеральный мениск имеет размер приблизительно 35,7 мм в длину и 29,3 мм в ширину [2]. Его можно разделить на шесть зон [3]. К ним относятся передний корень (зона 1), переднелатеральная зона между передним корнем и передней границей подколенного промежутка (зоны 2А и 2В), подколенный промежуток (зона 3), задненижний подколенно-менисковый пучок (зона 4), связочная зона (зона 5) и задний корень (зона 6). Анатомические исследования показали, что латеральный мениск занимает от 75 до 93% площади поверхности латерального плато большеберцовой кости [2; 7]. По результатам исследования, проведенного

К. Влоескер и соавт., было обнаружено, что латеральный мениск покрывает 59% латерального плато большеберцовой кости [8].

Мениски прикреплены к плато большеберцовой кости через их передние и задние корешки и удерживаются медиальной коллатеральной связкой, поперечной связкой, менискотибиальными связками и менискофemorальными связками [9]. Корни мениска представляют собой связкообразные структуры с фиброзно-хрящевыми соединениями [9]. Они необходимы для функционирования, поскольку закрепляют мениск, преобразуя осевые нагрузки в кольцевые напряжения, и предотвращают выдавливание во время нагрузки на сустав [10]. Менискотибиальная связка фиксирует весь наружный край медиального мениска к медиальному плато большеберцовой кости [2]. Медиальный мениск также прикреплен к задней кривой связке и заднемедиальной капсуле [2]. Большая часть внешней границы латерального мениска прикреплена к латеральному плато большеберцовой кости менискотибиальной связкой [4]. Латеральная менискотибиальная связка тоньше и эластичнее медиальной [4]. Кроме того, пересечение подколенного сухожилия частично нарушает это периферическое прикрепление [4]. В совокупности эти свойства позволяют латеральному мениску обладать повышенной подвижностью по сравнению с более статичным медиальным мениском.

Корни менисков

Понимание анатомии корней имеет решающее значение для клинической практики, поскольку нарушение методики восстановления общей анатомической структуры мениска может нарушить его функцию [11]. Структурно неповрежденные корни мениска сохраняют биомеханическую способность преобразовывать осевые нагрузки в кольцевые напряжения, предотвращать выдавливание и уменьшать нагрузку на суставной хрящ [12]. Деформированный корень мениска приводит к неспособности преобразовывать сжимающие нагрузки в кольцевые напряжения, а также приводит к обширному выдавливанию мениска из сустава [13]. Биомеханически это приводит к увеличению контактного давления на суставной хрящ, сопоставимого с усилием в колене после тотальной менискэктомии [14]. Клинически это проявляется быстрым прогрессированием остеоартроза [12; 14]. Последующие исследования продемонстрировали клиническую пользу анатомического восстановления корня мениска. Например, недавний метаанализ, проведенный А.К. Perry и соавт., продемонстрировал, что анатомическое восстановление разрывов медиального мениска заднего корня приводит к значительному улучшению биомеханических и клинических результатов [15].

Передняя межменисковая связка

Передняя межменисковая связка соединяет передние рога медиального и латерального менисков [2]. Она имеет в среднем 33 мм в длину и 3 мм в ширину [2]. С.М. Laprade и соавт. отметили, что передняя межменисковая связка присутствовала только в шести из двенадцати

включенных в исследование образцов коленного сустава, полученных от трупов [12]. В этих шести образцах центр переднемедиального корня мениска находился на расстоянии $11,4 \pm 1,9$ мм от центра медиального прикрепления передней межменисковой связки. Кроме того, передняя межменисковая связка была прикреплена к заднемедиальной части переднемедиального рога мениска во всех исследованных образцах. Относительно центра переднего латерального корня мениска центр латерального прикрепления передней менисковой связки находился на расстоянии $19,2 \pm 4,4$ мм друг от друга. Было также обнаружено, что передняя связка мениска прикреплена к переднелатеральной стороне переднего корня латерального мениска во всех шести образцах с этой связкой.

Хотя функция этой связки неясна, было предложено несколько теорий. Некоторые авторы выдвинули теорию, что связка играет потенциальную роль стабилизатора мениска при движении колена и играет роль в сенсомоторной функции колена [16; 17].

Фиксирующий аппарат медиального и латерального менисков

Ключевыми фиксирующими анатомическими структурами медиального мениска являются заднее менискокапсулярное соединение, задняя менискотибиальная связка, задняя косая связка, глубокая медиальная коллатеральная связка и полуперепончатое сухожилие. Менискотибиальные связки по окружности прикрепляют периферический край медиального и латерального менисков к краю мыщелка большеберцовой кости [2]. Медиальная менискотибиальная связка является более толстой и прочной структурой и ограничивает относительную подвижность медиального мениска. Она соединяется с задней капсулой, образуя сросшееся прикрепление к заднему рогу мениска [2]. Разрыв медиальной менискотибиальной связки называется поражением ската, когда она прилегает к заднему рогу медиального мениска и может привести к смещению медиального мениска с варусно-вальгусным напряжением и переднемедиальной ротационной нестабильностью [2; 18].

Задняя косая связка (ЗКС) состоит из двух структур. Нижняя менискофemorальная связка прикрепляет мениск к бедренной кости, имеет длину $8,2 \pm 2,1$ мм и прикрепляется на расстоянии $34,1 \pm 6,7$ мм от заднемедиального корня мениска [19]. Нижняя менискотибиальная связка прикрепляет медиальный мениск к большеберцовой кости, имеет длину $9,0 \pm 2,3$ мм и прикрепляется на $6,7 \pm 1,7$ мм ниже края суставного хряща медиального плато [19]. Середина медиального мениска прочно прикреплена к глубокой медиальной коллатеральной связке (МКС). МКС соединяется с передней менискофemorальной связкой и переднемедиальной капсулой. Он имеет менискофemorальный компонент и менискотибиальный компонент. Его менискофemorальное прикрепление имеет среднюю длину $14,8 \pm 3,8$ мм и центр, который находится на расстоянии $45,9 \pm 7,0$ мм медиальнее центра заднемедиального корня мениска [9]. Менискотибиальный компонент МКС имел длину $17,7 \pm 3,4$ мм и располагался на $6,4 \pm 1,9$ мм

ниже края суставного хряща латерального плато большеберцовой кости [19]. Наконец, передняя ветвь полуперепончатого сухожилия имела фасциальное прикрепление к медиальному мениску длиной $9,2 \pm 2,1$ мм [19].

Понимание анатомии фиксирующего аппарата латерального мениска имеет решающее значение, поскольку разрывы заднего рога латерального мениска трудно поддаются лечению из-за присущей ему повышенной подвижности [20]. Латеральная менискотибиальная связка имеет длину $12,8 \pm 3,9$ мм [20]. Она тоньше и эластичнее относительно медиальной стороны, и в ней также отсутствуют дискретные утолщения, наблюдаемые на медиальной менискотибиальной связке [2]. Он также отсутствует на протяжении всего подколенного промежутка [20]. Эти свойства делают латеральный мениск по своей природе более подвижным, чем медиальный. Заднелатеральное прикрепление капсулы составляет 11% от общей высоты заднего рога латерального мениска и находится на $7,6 \pm 2,5$ мм выше края суставного хряща большеберцовой кости [20]. Верхняя часть подколенной щели имеет среднюю длину $12,1 \pm 2,5$ мм, а ее центр начинается на расстоянии $33,6 \pm 3,7$ мм от центра заднего корня латерального мениска [20]. Нижняя часть подколенного промежутка имеет изогнутую длину $36,9 \pm 6,0$ мм и начинается на расстоянии $22,8 \pm 4,2$ мм от центра заднего корня латерального мениска [20].

Дополнительные прикрепления к латеральному мениску включают подколенно-менисковые пучки, менискофибулярную связку и менискофemorальную связку. Подколенно-менисковые пучки прочно прикрепляются от подколенного сухожилия к латеральному мениску [20]. Существует три подколенно-менисковых пучка: передне-нижний, задневерхний и задненижний [20; 21]. Передне-нижний пучок имеет длину $8,0 \pm 1,9$ мм и прикрепляется на $4,6 \pm 2,3$ мм выше края суставного хряща большеберцовой кости [20]. Задневерхний пучок имеет длину $6,5 \pm 1,5$ мм и прикрепляется на $6,2 \pm 1,9$ мм выше края суставного хряща большеберцовой кости [20]. Задненижний пучок проходит от нижнего края латерального мениска к подколенной фасции в заднем и дистальном направлении, хотя он не визуализируется при артроскопии и его существование оспаривается некоторыми авторами. Передне-нижний пучок образует дно подколенной щели, в то время как задневерхний пучок образует крышу подколенной щели [2]. Вместе эти пучки предотвращают медиальное смещение латерального мениска, и повреждения этих структур приведут к медиальному подвывиху мениска, боли в колене с боковой стороны и запиранию [22]. Повреждения этих структур часто происходят при сопутствующих повреждениях передней крестообразной связки (ПКС) и заднебокового угла (ЗБУ) [20].

Менискофибулярная связка берет начало от латерального мениска и входит в головку малоберцовой кости, непосредственно перед началом подколенной мышцы [2]. Сообщалось, что его ширина колеблется от 8 до 13 мм, длина колеблется от 13 до 22 мм, а средняя толщина составляет 3,84 мм [23]. Она имеет неясную функцию и, как полагают, помогает латеральной

менискотибиальной связке контролировать передне-заднее перемещение и внешнюю ротацию латерального мениска [2]. Это также может играть роль вторичного ограничителя варусной деформации и внешней ротации коленного сустава [2].

Наконец, существуют две менискофemorальные связки: связка Хамфри, которая является передней менискофemorальной связкой, и связка Врисберга, которая является задней менискофemorальной связкой [3; 24]. Связка Хамфри проходит спереди от задней крестообразной связки, а связка Врисберга проходит сзади от задней крестообразной связки [2]. Передняя менискофemorальная связка прикрепляется на расстоянии $5,5 \pm 2,9$ мм от центра заднего рога латерального мениска, а задняя менискофemorальная связка прикрепляется на расстоянии $11,5 \pm 4,4$ мм от центра заднего рога латерального мениска [20]. Менискофemorальные связки функционируют для соединения латерального заднего рога мениска с латеральной границей медиального мыщелка бедра [2]. Биомеханически они способствуют предотвращению выдавливания латерального мениска, а также обеспечивают вторичное ограничение заднего перемещения большеберцовой кости [24].

Биомеханика

Свойства распределения нагрузки мениска обеспечивают большую площадь контакта и снижение контактного давления в большеберцово-бедренном суставе [25]. Это особенно важно в латеральном отделе, где 70% нагрузки передается на латеральный мениск, по сравнению с 50% в медиальном отделе, из-за большей роли латерального мениска в обеспечении конгруэнтности сустава [25]. В дополнение к исследованию А.М. Ahmed и D.L. Burke, которое продемонстрировало уменьшение площади контакта на 50-70% и последующее увеличение контактного давления после медиальной менискэктомии, многочисленные недавние лабораторные исследования продемонстрировали влияние различных патологий менисков на биомеханику, кинетику и кинематику коленного сустава [26].

Биомеханика патологии мениска

Вертикальные разрывы мениска проходят параллельно периферическим волокнам экстрацеллюлярного матрикса и с меньшей вероятностью нарушают биомеханическую функцию мениска, поскольку эти разрывы обычно не нарушают способность мениска преобразовывать осевые нагрузки в кольцевые напряжения. Например, K.S. Goyal и соавт. не обнаружили разницы в контактных давлениях между образцами с неповрежденным боковым мениском по сравнению с образцами с искусственно созданным вертикальным разрывом [27]. Хотя это может быть верно для тела мениска, вертикальные разрывы в рогах мениска могут быть более проблематичными. Недавнее исследование методом конечных элементов, проведенное K. Zhang и соавт., продемонстрировало, что вертикальные разрывы на рогах менисков увеличивают пиковые сжимающие и сдвигающие напряжения на менисках, хрящах и

субхондральной кости как при статическом, так и при динамическом моделировании сгибания [28]. Авторы сообщили о более значимых биомеханических изменениях после разрывов медиального мениска и заднего рога. Это дополнительно подтверждается исследованием Z. Chen и соавт., которое продемонстрировало снижение контактного давления после продольного разрыва медиального мениска [29].

Как и вертикальные разрывы, горизонтальные разрывы не разрушают коллагеновые волокна по окружности. Однако горизонтальные разрывы действительно имеют более высокую корреляцию с измененной биомеханикой. В исследовании, проведенном в 2017 году B.S. Veamer и соавт., сообщалось об увеличении контактного давления на 70% по всем углам сгибания [30]. Более того, при лечении этого типа разрыва с помощью частичной менискэктомии предыдущие исследования показали, что резекция одной медиальной створки мениска увеличивает контактное давление на 33-46%, в то время как резекция обеих створок увеличивает давление на 75-79% [31].

Радиальные разрывы - это разрывы, которые проходят перпендикулярно коллагеновым волокнам по окружности и могут нарушить способность мениска преобразовывать нагрузки в кольцевые напряжения. Большие радиальные разрывы и разрывы корня могут быть функционально эквивалентны тотальной менискэктомии, поскольку они полностью разрушают коллагеновые волокна по окружности мениска, что приводит к функциональной недостаточности мениска [32]. При частичных разрывах лучевой кости мениск в определенной степени сохраняет присущую ему биомеханическую функцию. Исследования, проведенные с использованием трупного материала, показали, что частичные разрывы до 60-66% ширины мениска практически не влияют на свойства мениска рассеивать нагрузку [33].

Подобно радиальным разрывам, разрывы корня мениска также функционально эквивалентны тотальной менискэктомии. Корни менисков прикрепляют мениски к большеберцовой кости, чтобы предотвратить выдавливание и облегчить функцию мениска [2]. Подобно радиальным разрывам, корневые разрывы также не позволяют мениску преобразовывать осевые нагрузки в кольцевые напряжения [32]. Такая картина разрыва приводит к полному функциональному отказу мениска и подвергает коленный сустав высокому риску ускоренных дегенеративных изменений и нарушению биомеханики/кинematики. Контролируемое исследование, проведенное R. Allaire и соавт. на трупном материале, продемонстрировало, что разрывы корня мениска приводят к увеличению латерального смещения большеберцовой кости и увеличению углов приведения колена [34]. Эти результаты, по-видимому, применимы к кинематике *in vivo*. Исследование C.A. Marsh и соавт. продемонстрировало, что дисфункция медиального корня мениска значительно увеличивает латеральное смещение большеберцовой кости при ходьбе по ровной поверхности, ходьбе с

наклоном и приседании на корточки [35]. Y. Ishii и соавт. использовали инерционные датчики движения для оценки походки у пациентов с дисфункцией корня мениска, сообщив о положительной корреляции между величиной увеличения экстррузии мениска при переносе веса и увеличением боковой тяги колена [36]. Варусная тяга уже давно признана фактором риска прогрессирования поражения хряща медиального отдела и прогрессирования остеоартроза коленного сустава [37]. Характер походки с варусным толчком является основной особенностью одного из четырех различных типов походки при тяжелом остеоартрозе коленного сустава, описанного G. Lerogase и соавт., который авторы считают более значимым признаком, чем пиковые суставные углы [38].

Кинетика коленного сустава

Момент приведения колена (МПК) является хорошо зарекомендовавшим себя кинетическим показателем, который коррелирует с нагрузкой на медиальный отдел колена во время работы с отягощениями [39]. МПК является результатом как силы опоры, действующей на коленный сустав во время фазы стойки, так и перпендикулярного расстояния, на которое эта сила действует от центра сустава. Большой МПК приводит к увеличению варусной нагрузки и нагрузок на медиальный сустав, которые напрямую коррелируют с толщиной суставного хряща медиального отдела и прогрессированием остеоартроза коленного сустава [40].

Мениск играет важную роль в нормализации давления, испытываемого в коленном суставе. J.V. Thorlund и соавт. провели трехмерный анализ походки 23 пациентов с разрывом медиального мениска без остеоартроза коленного сустава до и через 1 год после частичной менискэктомии. Несмотря на значительное улучшение показателей по шкале оценки функционального состояния коленного сустава после перенесенной травмы и остеоартроза (KOOS), наблюдалось постоянное увеличение пика МПК после менискэктомии по сравнению с контралатеральной конечностью [41]. Кроме того, M. Hall и соавт. сообщили об увеличении пикового момента сгибания колена (МСК) при 2-летнем наблюдении за пациентами после частичной менискэктомии [42]. Совокупность этих исследований дополнительно указывает на роль менискэктомий в прогрессировании остеоартроза, поскольку повышенный МСК был связан с износом хряща на ранних стадиях остеоартроза, в то время как повышенный МПК тесно связан с более тяжелым течением остеоартроза.

Об одной и той же картине аномальной кинетики сообщалось в различных исследованиях, сравнивающих частичную менискэктомию и восстановление мениска в условиях реконструкции ПКС. J.J. Carin и соавт. оценили спортивную когорту пациентов после завершения полной реабилитации на фоне реконструкции ПКС [43]. Авторы использовали проверенную электромиографическую модель опорно-двигательного аппарата и классифицировали группы в соответствии с сопутствующим лечением медиального мениска.

Пациенты в группе частичной менискэктомии продемонстрировали более высокий пик МПК в оперированной конечности по сравнению с контралатеральной конечностью; однако такого увеличения МПК не наблюдалось у пациентов с интактным мениском и в группах восстановления мениска. Оцененные силы контакта медиального большеберцово-бедренного отдела также были увеличены в группе менискэктомии по сравнению с двумя другими группами через 2 года наблюдения [44].

Кинематика коленного сустава

Мениск играет важнейшую роль в физиологической кинематике коленного сустава *in vivo*. Существует множество данных, демонстрирующих изменение кинематики коленного сустава при неоптимальной функции мениска. В исследовании Y. Zhang и соавт. изучалась кинематика походки у пациентов с дефицитом ПКС с повреждениями мениска или без них [45]. Авторы продемонстрировали, что повреждения мениска нарушают физиологическую кинематику, и это изменение нормальной функции колена зависело от локализации разрыва мениска. У пациентов с сопутствующими разрывами медиального и латерального менисков наблюдалась аномальная сагиттальная экскурсия, особенно переднее смещение большеберцовой кости, в то время как у пациентов с изолированным разрывом медиального мениска наблюдалось значительное увеличение латерального смещения большеберцовой кости. A. Hosseini и соавт. сообщили о похожих результатах при подъеме по лестнице с помощью динамической рентгеноскопической оценки [46]. Последующее исследование, посвященное трехмерному анализу походки, продемонстрировало значительно увеличенные углы поворота в осевой плоскости в течение всего цикла ходьбы у пациентов с сопутствующими нестабильными разрывами мениска по сравнению с изолированными разрывами ПКС [47]. Аналогичным образом, отдельное исследование S. Ren и соавт. продемонстрировало увеличенную внешнюю ротацию большеберцовой кости во время фазы предварительного поворота у пациентов с дефицитом ПКС с сопутствующими разрывами заднего рога медиального мениска [48].

Заключение

Разрывы менисков могут вызвать серьезные функциональные, биомеханические и кинематические нарушения в коленном суставе, приводящие к ускоренной дегенерации суставного хряща. Глубокое понимание количественных и качественных взаимосвязей мениска и его фиксирующего аппарата с ключевыми артроскопическими ориентирами позволит хирургу анатомически устранить патологию мениска и восстановить естественную биомеханику сустава.

Список литературы

1. Самотесов П.А., Русских А.Н., Шабоха А.Д., Касимов В.И., Тюльков Е.В., Мамедов Р.Т., Волкова Ю.А., Полякова Д.И. Вариантная анатомия менисков коленных суставов мужчин различных конституциональных типов // Журнал анатомии и гистопатологии. 2019. №2. Р. 60-69.
2. LaPrade R.F., Chahla J. Evidence-Based Management of Complex Knee Injuries E-Book: Restoring the Anatomy to Achieve Best Outcomes. – Elsevier Health Sciences, 2020.
3. Zdanowicz U., Śmigielski R., Espejo-Reina A., Espejo-Baena A., Madry H. Anatomy and vascularisation // Surgery of the Meniscus. 2016. P. 15-21.
4. Сараев А.В., Корнилов Н.Н., Куляба Т.А., Шубняков М.И., Демин А.С., Столяров А.А., Серeda А.П. Артроскопическая менискэктомия у больных гонартрозом: разрыв между доказательной медициной и мнением практикующего специалиста // Травматология и ортопедия России. 2022. №4. С. 5-20.
5. Хамидов О., Гайбуллаев Ш., Давранов И. Сравнение результатов УЗИ и МРТ в диагностике повреждений мениска коленного сустава // Евразийский журнал медицинских и естественных наук. 2023. №4. С. 176–183.
6. Bloecker K., Wirth W., Hudelmaier M., Burgkart R., Frobell R., Eckstein F. Morphometric differences between the medial and lateral meniscus in healthy men – a three-dimensional analysis using magnetic resonance imaging // Cells, Tissues, Organs. 2012. Vol. 195. Is. 4. P. 353–364.
7. Rohilla J., Rathee S.K., Dhatarwal S.K., Kundu Z. Morphometric analysis of menisci of adult human knee joint in North Indian population // Int. J. Res. Med. Sci. 2017. Is. 5. P. 569.
8. Jacob G., Shimomura K., Krych A.J., Nakamura N. The meniscus tear: a review of stem cell therapies // Cells. 2019. Vol. 9. Is. 1. P. 92.
9. LaPrade R.F., Floyd E.R., Carlson G.B., Moatshe G., Chahla J., Monson J.K. Meniscal root tears: solving the silent epidemic // J. Arthrosc. Surg. Sports Med. 2021. Vol. 2. Is. 1. P. 47-57.
10. Курганова Н.А. Функциональная анатомия коленного сустава, его биомеханика и протезирование // Бюллетень медицинских интернет-конференций. 2019. №10. С. 430-430.
11. Laprade C.M., Ellman M.B., Rasmussen M.T., James E.W., Wijdicks C.A., Engebretsen L. Anatomy of the anterior root attachments of the medial and lateral menisci // Am. J. Sports Med. 2014. Vol. 42. Is. 10. P. 2386–2392.
12. Chahla J., LaPrade R.F. Meniscal root tears // Arthroscopy. 2019. Vol. 35. Is. 5. P. 1304–1305.
13. Johannsen A.M., Civitarese D.M., Padalecki J.R., Goldsmith M.T., Wijdicks C.A., LaPrade R.F. Qualitative and quantitative anatomic analysis of the posterior root attachments of the medial

and lateral menisci // *Am. J. Sports Med.* 2012. Vol. 40. Is. 10. P. 2342–2347.

14. Hussain Z.B., Chahla J., Mandelbaum B.R., Gomoll A.H., LaPrade R.F. The role of meniscal tears in spontaneous osteonecrosis of the knee: a systematic review of suspected etiology and a call to revisit Nomenclature // *Am. J. Sports Med.* 2019. Vol. 47. Is. 2. P. 501–507.

15. Perry A.K., Lavoie-Gagne O., Knapik D.M., Maheshwer B., Hodakowski A., Gursoy S. Examining the efficacy of medial meniscus posterior root repair: a meta-analysis and systematic review of biomechanical and clinical outcomes // *Am. J. Sports Med.* 2022:036354652210772.

16. Стулов А.С., Тарасов А.Н. «Ловушки» магнитно-резонансной томографии в диагностике повреждений менисков коленного сустава // *Гений ортопедии.* 2017. № 4. С. 444-449

17. Guess T.M., Razu S.S., Kuroki K., Cook J.L. Function of the anterior intermeniscal ligament // *J Knee Surg.* 2018. Vol. 31. Is. 1. P. 68–74.

18. Нефедов А.М., Луцай В.И. Основные методы оперативного лечения разрыва передней крестовидной связки (обзорная) // *Академическая публицистика.* 2021. № 4. С. 653-656

19. DePhillipo N., Moatshe G., Chahla J., Aman Z.S., Storaci H.W., Morris E.R. Quantitative and qualitative assessment of the posterior medial meniscus anatomy: defining meniscal ramp lesions // *Am. J. Sports Med.* 2018. Vol. 47. Is. 2. P. 372–378.

20. Aman Z.S., DePhillipo N.N., Storaci H.W., Moatshe G., Chahla J., Engebretsen L. Quantitative and qualitative assessment of posterolateral meniscal anatomy: defining the popliteal hiatus, popliteomeniscal fascicles, and the lateral meniscotibial ligament // *Am. J. Sports Med.* 2019. Vol. 47. Is. 8. P. 1797–1803.

21. Скворцов Д.В., Кауркин С.Н., Ахпашев А.А., Агзамов Д.С., Канаев А.С., Лобов А.Н., Плотников В.П., Журавлева А.И. Биомеханика ходьбы до и после оперативного лечения повреждения менисков коленного сустава // *Научно-практическая ревматология.* 2019. №1. С. 106-110.

22. LaPrade R.F., Konowalchuk B.K. Popliteomeniscal fascicle tears causing symptomatic lateral compartment knee pain: diagnosis by the figure-4 test and treatment by open repair // *Am. J. Sports Med.* 2005. Vol. 33. Is. 8. P. 1231–1236.

23. Коструб А.А., Поляченко Ю.В., Котюк В.В., Герасименко М.А., Мазевич В.Б., Никифорова И.Н., Блонский Р.И., Смирнов Д.А. Вклад повреждений антеролатеральной связки в нестабильность коленного сустава и современные методы их диагностики // *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия медицинских наук.* 2020. №3. С. 372-380.

24. Эпштейн А.А., Призов А.П., Лазко Ф.Л., Загородний Н.В., Ахпашев А.А. Антеролатеральная связка коленного сустава как важный стабилизатор ротационной нестабильности коленного сустава // *Клиническая практика.* 2019. №1. С. 72-80.

25. Rasheed B., Ayyalasomayajula V., Schaarschmidt U., Vagstad T., Schaathun H.G. Region- and layer-specific investigations of the human menisci using SHG imaging and biaxial testing // *Front Bioeng Biotechnol.* 2023. Is. 11. P. 1167427.
26. Ahmed A.M., Burke D.L. In-vitro measurement of static pressure distribution in synovial joints--Part I: Tibial surface of the knee // *J. Biomech. Eng.* 1983. Vol. 105. Is. 3. P. 216–225.
27. Goyal K.S., Pan T.J., Tran D., Dumpe S.C., Zhang X., Harner C.D. Vertical tears of the lateral meniscus: effects on in vitro tibiofemoral joint mechanics // *Orthop. J. Sports Med.* 2014. Vol. 2. Is. 8. P. 2325967114541237.
28. Zhang K., Li L., Yang L., Shi J., Zhu L., Liang H. The biomechanical changes of load distribution with longitudinal tears of meniscal horns on knee joint: a finite element analysis // *J. Orthop. Surg. Res.* 2019. Vol. 14. Is. 1. P. 237.
29. Chen Z., Zhang H., Luo H., Yang R., Zhang Z., Jiang C., Hou J., Zhou Y., Xu Y., Song B., Li W. Contact mechanics after mattress suture repair of medial meniscus vertical longitudinal tear: an in vitro study // *Arch. Orthop. Trauma Surg.* 2020. Vol. 140. Is. 9. P. 1221–1230.
30. Beamer B.S., Walley K.C., Okajima S., Manoukian O.S., Perez-Viloria M., DeAngelis J.P. Changes in contact area in meniscus horizontal cleavage tears subjected to repair and resection // *Arthroscopy.* 2017. Vol. 33. Is. 3. P. 617–624.
31. Brown M.J., Farrell J.P., Kluczynski M.A., Marzo J.M. Biomechanical effects of a horizontal medial meniscal tear and subsequent leaflet resection // *Am. J. Sports Med.* 2016. Vol. 44. Is. 4. P. 850–854.
32. Cinque M.E., Chahla J., Moatshe G., Faucett S.C., Krych A.J., LaPrade R.F. Meniscal root tears: a silent epidemic // *Br J Sports Med.* 2018. Vol. 52. Is. 13. P. 872–876.
33. Bedi A., Kelly N.H., Baad M., Fox A.J., Brophy R.H., Warren R.F. Dynamic contact mechanics of the medial meniscus as a function of radial tear, repair, and partial meniscectomy // *J. Bone Joint Surg Am.* 2010. Vol. 92. Is. 6. P. 398–1408.
34. Allaire R., Muriuki M., Gilbertson L., Harner C.D. Biomechanical consequences of a tear of the posterior root of the medial meniscus: similar to total meniscectomy // *J. Bone Joint Surg Am.* 2008. Vol. 90. Is. 9. P. 1922–1931.
35. Marsh C.A., Martin D.E., Harner C.D., Tashman S. Effect of posterior horn medial meniscus root tear on in vivo knee kinematics // *Orthop. J. Sports Med.* 2014. Vol. 2. Is. 7. P. 2325967114541220.
36. Ishii Y., Ishikawa M., Kurumadani H., Hayashi S., Nakamae A., Nakasa T., Sumida Y., Tsuyuguchi Y., Kanemitsu M., Deie M., Adachi N., Sunagawa T. Increase in medial meniscal extrusion in the weight-bearing position observed on ultrasonography correlates with lateral thrust in early-stage knee osteoarthritis // *J. Orthop. Sci.* 2020. Vol. 25. Is. 4. P. 640–646.

37. Wink A.E., Gross K.D., Brown C.A., Guermazi A., Roemer F., Niu J., Torner J., Lewis C.E., Nevitt M.C., Tolstykh I., Sharma L., Felson D.T. Varus thrust during walking and the risk of incident and worsening medial tibiofemoral MRI lesions: the Multicenter Osteoarthritis Study // *Osteoarthr. Cartil.* 2017. Vol. 25. Is. 6. P. 839–845.
38. Leporace G., Gonzalez F., Metsavaht L., Motta M., Carpes F.P., Chahla J.. Are there different gait profiles in patients with advanced knee osteoarthritis? A machine learning approach // *Clin. Biomech (Bristol, Avon)*. 2021. Vol. 88. P. 105447.
39. Zhao D., Banks S.A., Mitchell K.H., D'Lima D.D., Colwell C.W., Jr, Fregly B.J. Correlation between the knee adduction torque and medial contact force for a variety of gait patterns // *J. Orthop. Res.* 2007. Vol. 25. Is. 6. P. 789–797.
40. Erhart-Hledik J.C., Favre J., Andriacchi T.P. New insight in the relationship between regional patterns of knee cartilage thickness, osteoarthritis disease severity, and gait mechanics // *J. Biomech.* 2015. Vol. 48. Is. 14. P. 3868–3875.
41. Thorlund J.B., Holsgaard-Larsen A., Creaby M.W., Jørgensen G.M., Nissen N., Englund M., Lohmander L.S. Changes in knee joint load indices from before to 12 months after arthroscopic partial meniscectomy: a prospective cohort study // *Osteoarthr. Cartil.* 2016. Vol. 24. Is. 7. P. 1153–1159.
42. Hall M., Wrigley T.V., Metcalf B.R., Hinman R.S., Cicuttini F.M., Dempsey A.R. Mechanisms underpinning the peak knee flexion moment increase over 2-years following arthroscopic partial meniscectomy // *Clin. Biomech (Bristol, Avon)*. 2015. Vol. 30. Is. 10. P. 1060–1065.
43. Capin J.J., Khandha A., Zarzycki R., Manal K., Buchanan T.S., Snyder-Mackler L. Gait mechanics after ACL reconstruction differ according to medial meniscal treatment // *J. Bone Joint Surg Am.* 2018. Vol. 100. Is. 14. P. 1209–1216.
44. Capin J.J., Khandha A., Buchanan T.S., Snyder-Mackler L. Partial medial meniscectomy leads to altered walking mechanics two years after anterior cruciate ligament reconstruction: meniscal repair does not // *Gait Posture.* 2019. Vol. 74. P. 87–93.
45. Zhang Y, Huang W, Yao Z, Ma L, Lin Z, Wang S, Huang H. Anterior cruciate ligament injuries alter the kinematics of knees with or without meniscal deficiency // *Am. J. Sports Med.* 2016. Vol. 44. Is. 12. P. 3132–3139.
46. Hosseini A., Li J-S., Gill T.J.T., Li G. Meniscus injuries alter the kinematics of knees with anterior cruciate ligament deficiency // *Orthop. J. Sports Med.* 2014. Vol. 2. Is. 8. DOI: 10.1177/2325967114547346.
47. Harato K., Niki Y., Kudo Y., Sakurai A., Nagura T., Hasegawa T., Masumoto K., Otani T. Effect of unstable meniscal injury on three-dimensional knee kinematics during gait in anterior cruciate ligament-deficient patients // *Knee.* 2015. Vol. 22. Is. 5. P. 395–399.

48. Ren S., Yu Y., Shi H., Miao X., Jiang Y., Liang Z., Hu X., Huang H., Ao Y. Three dimensional knee kinematics and kinetics in ACL-deficient patients with and without medial meniscus posterior horn tear during level walking // *Gait Posture*. 2018. Vol. 66. P. 26–31.