

Микроструктура связочного аппарата пятой плюсневой кости

Д.В. Дуков¹, А.Н. Русских¹, А.Д. Шабоха¹, Ф.В. Алябьев¹, В.А. Хоржевский²,
А.Ф. Макаров³, Б.И. Яремин^{4,5}

¹ Красноярский государственный медицинский университет им. профессора В.Ф. Войно-Ясенецкого Минздрава России

660022, г. Красноярск, ул. Партизана Железняка, 1

² Красноярское краевое патолого-анатомическое бюро

660022, г. Красноярск, ул. Партизана Железняка, 3

³ ООО «Красноярский центр пластической хирургии»

660017, г. Красноярск, пр. Мира, 93

⁴ НИИ скорой помощи им. Н.В. Склифосовского Департамента здравоохранения г. Москвы

129090, г. Москва, Большая Сухаревская пл., 3

⁵ Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова Минздрава России

129090, г. Москва, Большая Сухаревская пл., 3, корп. 5

Резюме

Энтезисы уязвимы к острым травмам при чрезмерных нагрузках, а также являются основным органом-мишенью при ряде ревматических состояний. Цель исследования – изучить особенности микроскопического строения энтезисов V плюсневой кости человека. **Материал и методы.** Исследованы стопы трупов 56 мужчин 21–35 лет. На микропрепаратах V плюсневой кости с ее связочным аппаратом измеряли толщину зон фиброзно-хрящевого энтезиса с описанием расположения коллагеновых волокон и подсчитывали их удельное содержание на единицу площади в зонах обызвествленного и минерализованного волокнистого хряща энтезиса с последующим сравнительным анализом полученных данных. **Результаты и их обсуждение.** Установлено, что соединения всех четырех связок и сухожилия к V плюсневой кости по своей гистологической структуре являются фиброзно-хрящевыми энтезисами с четырьмя отдельными зонами. Выявлено достоверное преобладание толщины зоны обызвествленного волокнистого хряща над толщиной зоны минерализованного волокнистого хряща энтезисов сухожилия короткой малоберцовой мышцы, плюсневой подошвенной и коллатеральной связок с параллельным расположением извитых коллагеновых волокон и единичными зрелыми хондроцитами и их изогенными группами. Максимальная толщина зоны обызвествленного волокнистого хряща отмечена для энтезиса глубокой поперечной плюсневой связки с прямым расположением коллагеновых волокон и множеством изогенных групп хондроцитов, минимальная – для предплюсне-плюсневой и длинной подошвенной связок с хаотично переплетенными коллагеновыми волокнами и множеством зрелых хондроцитов и их изогенных групп. Зубчатая базофильная линия энтезиса сухожилия короткой малоберцовой мышцы характеризуется наибольшими толщиной и амплитудой зубцов. Выявлено уменьшение доли коллагеновых волокон от обызвествленной до минерализованной зоны у энтезисов сухожилия короткой малоберцовой мышцы и комплекса предплюсне-плюсневой и длинной подошвенных связок, увеличение доли коллагена в сторону минерализованной зоны у энтезиса глубокой поперечной плюсневой связок и одинаковая его доля у энтезисов плюсневой подошвенной и коллатеральной связок. **Заключение.** Проведенное исследование с обнаружением особенностей микроструктуры энтезисов V плюсневой кости свидетельствует о существовании возрастных, половых, а возможно, и конституциональных закономерностей их строения и предрасположенности к механической травме.

Ключевые слова: гистологическое исследование, пятая плюсневая кость, фиброзно-хрящевой энтезис.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Автор для переписки. Шабоха А.Д., e-mail: tat_yak@mail.ru

Для цитирования. Дуков Д.В., Русских А.Н., Шабоха А.Д., Алябьев Ф.В., Хоржевский В.А., Макаров А.Ф., Яремин Б.И. Микроструктура связочного аппарата пятой плюсневой кости. *Сиб. науч. мед. ж.* 2025;45(1):42–50. doi: 10.18699/SSMJ20250104

Microstructure of the ligamentous apparatus of the fifth metatarsal bone

D.V. Dukov¹, A.N. Russkikh¹, A.D. Shabokha¹, F.V. Alyabyev¹, V.A. Khorzhevsky²,
A.F. Makarov³, B.I. Yaremin^{4,5}

¹Professor V.F. Voino-Yasenetsky Krasnoyarsk State Medical University of Minzdrav of Russia
660022, Krasnoyarsk, Partizana Zheleznyaka st., 1

²Krasnoyarsk Regional Pathological Anatomy Bureau
660022, Krasnoyarsk, Partizana Zhheleznyaka st., 3d

³Krasnoyarsk Center for Plastic Surgery
660017, Krasnoyarsk, Mira ave. , 93

⁴N.V. Sklifosovsky Research Institute of Emergency Care
129090, Moscow, Bolshaya Sukharevskaya sq., 3

⁵N.I. Pirogov Russian National Research Medical University of Minzdrav of Russia
129090, Moscow, Bolshaya Sukharevskaya sq., 3

Abstract

Entheses are vulnerable to acute trauma under excessive loads, and are also the main target organ in a number of rheumatic conditions. Aim of the study was to investigate the features of the microscopic structure of the entheses of the fifth metatarsal bone in humans. **Material and methods.** The feet of 56 male cadavers aged 21–35 years were studied. On micropreparations of the fifth metatarsal bone with its ligamentous apparatus, the thickness of the fibrocartilaginous entheses zones was measured, the location of collagen fibers was described, and their percentage content per unit area in the zones of calcified and mineralized fibrous cartilage of the entheses was calculated, followed by a comparative analysis of the data obtained. **Results and discussion.** It was found that the connections of all four ligaments and the tendon to the V metatarsal bone are fibrocartilaginous entheses with four separate zones in their histological structure. A reliable predominance of the thickness of the calcified fibrous cartilage zone over the thickness of the mineralized fibrous cartilage zone of the entheses of the tendon of the short peroneus muscle, metatarsal plantar and collateral ligaments with a parallel arrangement of convoluted collagen fibers and single mature chondrocytes and their isogenic groups was revealed. The maximum thickness of the calcified fibrous cartilage zone is noted for the entheses of the deep transverse metatarsal ligament with a direct arrangement of collagen fibers and multiple isogenic groups of chondrocytes, the minimum – for the tarsometatarsal and long plantar ligaments with chaotically intertwined collagen fibers and many mature chondrocytes and their isogenic groups. The serrated basophilic line of entheses of the tendon of the peroneus brevis muscle is characterized by the greatest thickness and amplitude of the serrations. A decrease in the proportion of collagen fibers from the calcified to the mineralized zone was revealed at the entheses of the tendon of the short peroneus muscle and the complex of the tarsometatarsal and long plantar ligaments; an increase in the proportion of collagen towards the mineralized zone at the entheses of the deep transverse metatarsal ligament and its equal proportion at the entheses of the metatarsal plantar and collateral ligaments. **Conclusions.** The conducted study with the discovery of the features of the microstructure of the entheses of the fifth metatarsal bone testifies to the existence of age, sex, and possibly constitutional patterns of their structure and predisposition to mechanical injury.

Key words: histological study; fifth metatarsal bone, fibrocartilaginous entheses.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Corresponding author. Shabokha A.D., e-mail: tat_yak@mail.ru

Citation. Dukov D.V., Russkikh A.N., Shabokha A.D., Alyabyev F.V., Khorzhevsky V.A., Makarov A.F., Yaremin B.I. Microstructure of the ligamentous apparatus of the fifth metatarsal bone. *Sibirskiy nauchnyy medicinskiy zhurnal* = *Siberian Scientific Medical Journal*. 2025;45(1):42–50. [In Russian]. doi: 10.18699/SSMJ20250104

Введение

Место фиксации связки или сухожилия к кости называется энтезисом, его основными функциями являются крепление, а также передача и рассеивание напряжения [1–4]. Энтезисы весьма уязвимы к острым травмам при чрезмерных фи-

зических нагрузках, поскольку именно в области энтезиса концентрация напряжения на границе раздела кости и связки/сухожилия максимальна [5]. Повторяющееся напряжение или механическая перегрузка зачастую являются лишь провоцирующими факторами развития энтезопатии,

причем поражаются чаще именно те энтезисы, которые чаще подвергались механической травме [6–8]. Они также служат основным органом-мишенью при таких ревматических состояниях, как серонегативные спондилоартропатии, в том числе наиболее известном из них – анкилозирующем спондилоартрите [9–13].

В данной работе описаны особенности микроскопического строения энтезисов V плюсневой кости человека, отличающейся от других костей плюсны биомеханикой движения, механической нагрузкой, а следовательно, поражением при целом ряде ортопедических заболеваний и энтезопатий. Исходя из того, что коллагеновый скелет любого соединения связки/сухожилия с костью – основа, позволяющая противостоять чрезмерному механическому воздействию, а увеличение межклеточного матрикса, количества изогенных групп и диаметра хондроцитов – проявление дегенеративных изменений, обуславливающих предрасположенность к травмам, целью настоящего исследования явилось изучение особенностей микроскопического строения энтезисов V плюсневой кости человека.

Материал и методы

Изучены энтезисы V плюсневой кости обеих стоп трупов 56 мужчин 21–35 лет. Исследование одобрено локальным этическим комитетом ФГБОУ ВО Красноярский государственный медицинский университет им. проф. В.Ф. Войно-Ясенецкого Минздрава России (выписка № 100/2020 от 23.09.2020).

После изъятия биологический материал фиксировался стандартным образом в 10%-м растворе формалина. После декальцинации макропрепаратов были изготовлены микропрепараты V плюсневой кости с ее связочным аппаратом на уровне головки и основания – мест типичного прикрепления связок и сухожилия. В работе использована классификация гистологической структуры энтезисов, основанная на типе ткани, присутствующей в месте прикрепления – волокнистая («непрямое» соединение) либо фиброзно-хрящевая («прямое» соединение) [14, 15].

Для более четкой визуализации коллагенового волокна (верификации соединительной ткани), его направления и количественного анализа, а также определения зон фиброзно-хрящевого энтезиса применен метод трихромного окрашивания образцов ткани по К. Массону. Микропрепараты с окрашенными гистологическими срезами сканировали на микроскопе Pannoramic 250 Flash II 68 (3DHitech Ltd., Венгрия) в автоматическом режиме при увеличении объектива $\times 40$ и исследовали в программе CaseViewer v.2.3 3DHitech,

позволяющей проводить полную морфометрию с получением реальных размеров расстояний в метрической системе. Измеряли толщину зон фиброзно-хрящевого энтезиса с описанием расположения коллагеновых волокон (пучки коллагеновых волокон ориентированы в направлении наибольшего напряжения) и подсчитывали их удельное содержание на единицу площади в зонах обызвествленного и минерализованного волокнистого хряща энтезиса неизменной ткани изучаемых срезов. Критерий включения – отсутствие каких-либо дегенеративно-дистрофических, а также воспалительных изменений со стороны соединения связки/сухожилия с костью [16]. Дана характеристика состояния базофильной линии, которая представляет собой настоящий переход ткани сухожилия к кости и создает границу с субхондральной спонгиозой. От выраженности неровности этой линии зависит прочность соединения сухожилия с костью – чем она больше, тем прочнее соединение [10, 11, 17].

Проведен сравнительный анализ микроструктурных особенностей энтезисов с использованием программ SPSS Statistics 23,0 и Microsoft Excel. Для определения нормальности распределения выборки использовали критерий Шапиро – Уилка. Вариационные ряды количественных признаков с непараметрическим характером распределения описаны с помощью медианы (Me) и процентилей [P_{25} ; P_{75}]. При сравнении двух независимых выборок непараметрических данных применяли критерий Манна – Уитни, критический уровень значимости нулевой статистической гипотезы (p) принимали равным 0,05 [18].

Результаты

V плюсневая кость человека имеет пять энтезисов, два из которых располагаются в проекции головки кости и представляют собой остеолигаментозное соединение (рис. 1, а). Это соединение кости с глубокой поперечной плюсневой и коллатеральной связками. Остальные три энтезиса находятся в проекции основания кости, два из них остеолигаментозные – соединение с плюсневой, длинной и предплюсне-плюсневой подошвенными связками, а одно остеотендинозное – с сухожилием короткой малоберцовой мышцы (рис. 1, б). В результате исследования установлено, что места контактов всех четырех связок и сухожилия с V плюсневой костью имеют прямое соединение с ней и, соответственно, по своей микроскопической структуре являются фиброзно-хрящевыми энтезисами.

На рис. 2 представлен фиброзно-хрящевой энтезис сухожилия короткой малоберцовой мышцы с бугристостью V плюсневой кости. Он имеет

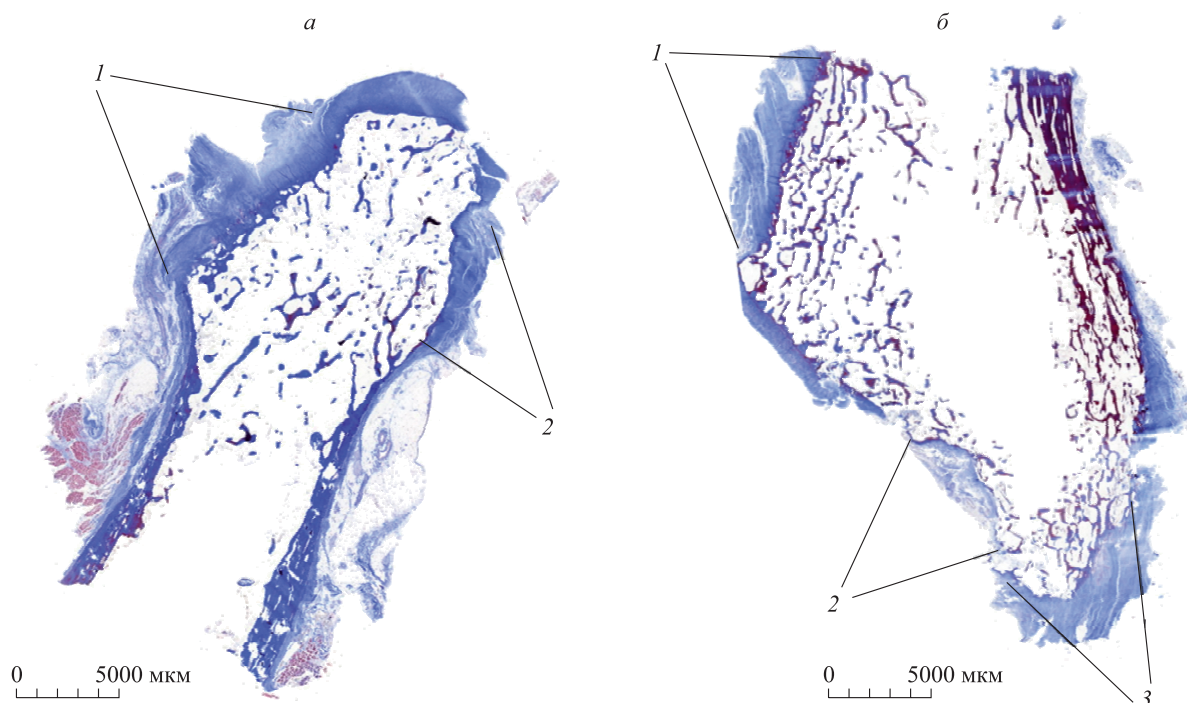


Рис. 1. Энтезисы головки (а) и основания (б) V плюсневой кости, трихромное окрашивание по К. Массону, ув. $\times 10$; а: 1 – глубокая поперечная плюсневая связка, 2 – коллатеральная связка; б: 1 – плюсневая подошвенная связка, 2 – предплюсне-плюсневая и длинная подошвенные связки, 3 – сухожилие короткой малоберцовой мышцы

Fig. 1. Enteses of the head (a) and of the base of the V metatarsal bone (б), trichrome staining according to K. Masson, magnification $\times 10$; а: 1 – deep transverse metatarsal ligament, 2 – collateral ligament; б: 1 – metatarsal plantar ligament, 2 – tarsometatarsal and long plantar ligaments, 3 – tendon of the short peroneus muscle

четыре отдельные зоны, которые структурно образуют непрерывный переход от соединительной ткани к костной. Первая зона данного соединения (1) – обогащенная фибробластами плотная оформленная соединительная ткань, тяжи коллагеновых волокон которой ориентированы пре-

имущественно в одной плоскости. Вторая зона (2) – волокнистый хрящ без признаков обызвествления или вторичной оссификации, характеризующийся наличием множественных аваскулярных участков. Основу данной зоны составляют зрелые хондроциты, порой формирующие изо-

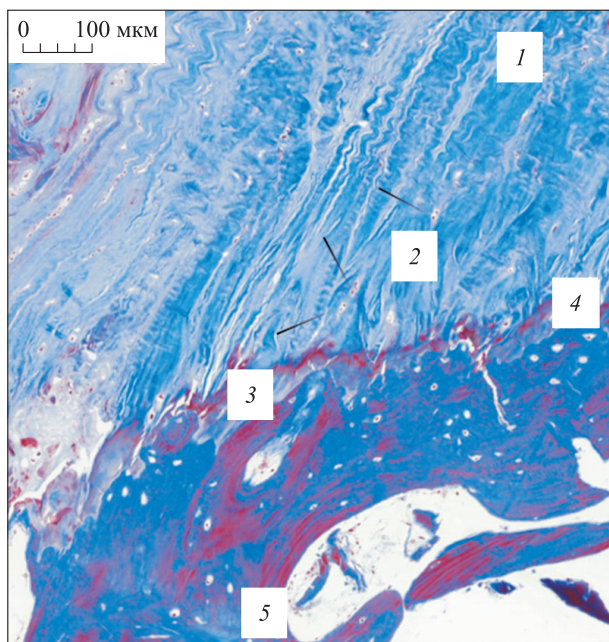


Рис. 2. Зоны фиброзно-хрящевого энтезиса (сухожилие короткой малоберцовой мышцы с бугристостью V плюсневой кости) (трихромное окрашивание по К. Массону, ув. $\times 100$). 1 – плотная волокнистая соединительная ткань, 2 – некальцинированный фиброзно-хрящевой материал с наличием изогенных групп хондроцитов (стрелки), 3 – кальцинированный фиброзно-хрящевой материал, 4 – базофильная линия, 5 – кость

Fig. 2. Zones of fibrocartilaginous enthesis (tendon of the peroneus brevis muscle with the tuberosity of the 5th metatarsal bone) (trichrome staining according to K. Masson, magnification $\times 100$). 1 – dense fibrous connective tissue, 2 – non-calcified fibrocartilaginous material with the presence of isogenic groups of chondrocytes (arrows), 3 – calcified fibrocartilaginous material, 4 – basophilic line, 5 – bone

генные группы, и межклеточный коллагеновый матрикс. Третья зона (3) – минерализованный волокнистый хрящ. Это аваскулярная зона, представленная хрящевой тканью с признаками обызвествления, основную клеточную популяцию в которой составляют хондроциты и фиброциты коллагеновых пучков, ориентированных преимущественно в одной плоскости. Вторая и третья зоны отделены друг от друга «меткой прилива» (4) – базофильной линией. Четвертая зона представлена собственно костной тканью (5).

Толщина зоны обызвествленного волокнистого хряща энтезиса сухожилия короткой малоберцовой мышцы и минерализованного волокнистого хряща составляет 440 [220; 520] и 188 [117; 212] мкм соответственно ($p = 0,02$). Параллельным ходом извитых коллагеновых волокон, наличием зрелых хондроцитов и их единичных изогенных групп характеризуется зона обызвест-

вленного волокнистого хряща энтезисов плюсневой подошвенной и коллатеральной связок (рис. 3, 4), ее толщина составляет 350 [330; 380] и 220 [178; 240] мкм соответственно, будучи в обоих случаях больше зоны минерализованного волокнистого хряща (125 [90; 198] и 98 [78; 104] мкм соответственно) ($p = 0,02$).

Соединение глубокой поперечной плюсневой связки с V плюсневой костью характеризуется практически прямыми параллельно расположенными коллагеновыми волокнами с множеством изогенных групп хондроцитов зоны обызвествленного волокнистого хряща и максимальным значением ее толщины, которая в несколько раз больше толщины энтезисов V плюсневой кости и зоны минерализованного волокнистого хряща (табл. 1). Волокна коллагена здесь расположены хаотично, между ними встречаются единичные хондроциты. Особой микроструктурой зон во-

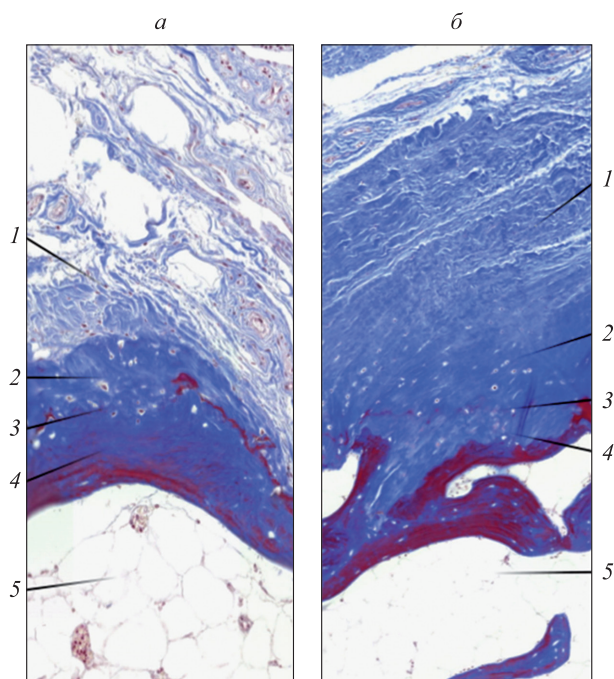


Рис. 3. Зоны фиброзно-хрящевого энтезиса основания V плюсневой кости с предплюсне-плюсневой и длинной подошвенной связками (а), плюсневой подошвенной связкой (б) (трихромное окрашивание по К. Массону, ув. $\times 100$). 1 – плотная волокнистая соединительная ткань, 2 – некальцинированный фиброзно-хрящевой материал, 3 – кость, 4 – базофильная линия, 5 – костный мозг

Fig. 3. Zones of fibrocartilaginous enthesis of the base of the 5th metatarsal bone with tarsometatarsal and long plantar ligaments (a), metatarsal plantar ligament (b) (trichrome staining according to K. Masson, magnification $\times 100$). 1 – dense fibrous connective tissue, 2 – non-calcified fibrocartilaginous material, 3 – bone, 4 – basophilic line, 5 – bone marrow

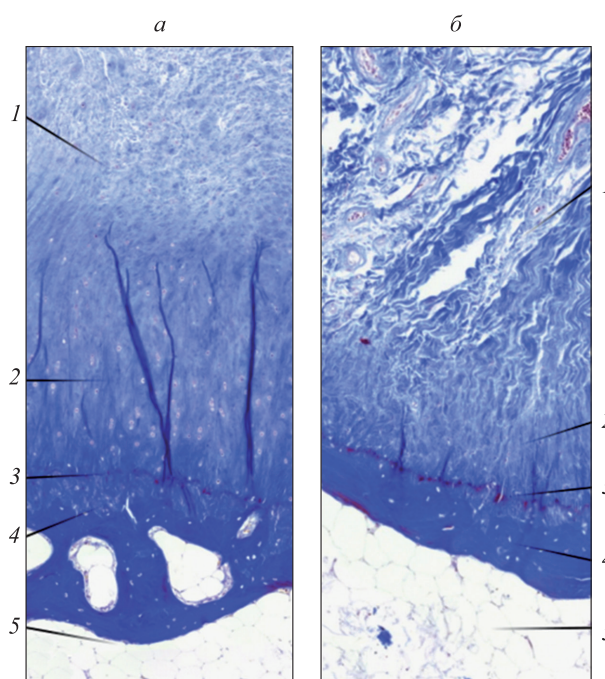


Рис. 4. Зоны фиброзно-хрящевого энтезиса головки V плюсневой кости с глубокой поперечной плюсневой связкой (а) и коллатеральной связкой (б) (трихромное окрашивание по К. Массону, ув. $\times 100$). 1 – плотная волокнистая соединительная ткань, 2 – некальцинированный фиброзно-хрящевой материал, 3 – кость, 4 – базофильная линия, 5 – костный мозг

Fig. 4. Zones of fibrocartilaginous enthesis of the head of the 5th metatarsal bone with deep transverse metatarsal ligament and with collateral ligament (trichrome staining according to K. Masson, magnification $\times 100$). 1 – dense fibrous connective tissue, 2 – non-calcified fibrocartilaginous material, 3 – bone, 4 – basophilic line, 5 – bone marrow

Таблица 1. Толщина зон обызвествленного и минерализованного волокнистого хряща, базофильной линии энтезисов V плюсневой кости трупов мужчин, мкм

Table 1. Thickness of calcified and mineralized fibrocartilage zones, basophilic line of entheses of the V metatarsal bone in male cadavers, μm

Энтезис	Обызвествленный волокнистый хрящ	Минерализованный волокнистый хрящ	Базофильная линия	Уровень значимости различий
	1	2	3	
Сухожилие короткой малоберцовой мышцы	440 [220,00; 520]	188 [117; 212]	68 [44; 74]	$p_{1-2}=0,02$
Предплюсне-плюсневая и длинная подошвенные связки	56 [38; 64]	88 [76; 98]	20 [18; 24]	$p_{1-2}=0,04$
Плюсневая подошвенная связка	350 [330; 380]	125 [90; 198]	26 [20; 36]	$p_{1-2}=0,02$
Глубокая поперечная плюсневая связка	712 [690; 734]	95 [80; 108]	9 [7; 14]	$p_{1-2}=0,01$
Коллатеральная связка	220 [178; 240]	98 [78; 104]	25 [21; 30]	$p_{1-2}=0,02$

локнистого хряща отличается энтезис комплекса предплюсне-плюсневой и длинной подошвенной связок. Во-первых, картина хаотично переплетенных коллагеновых волокон зоны плотной оформленной соединительной ткани прослеживается и в зоне обызвествленного волокнистого хряща. Здесь же определяются множество хондроцитов, увеличенных в размере, и их изогенные группы (см. рис. 3). Во-вторых, толщина зоны обызвествленного волокнистого хряща значимо меньше толщины как этой зоны других энтезисов, так и зоны минерализованного волокнистого хряща, чего не регистрируется у других энтезисов (см. табл. 1).

Базофильная линия энтезиса сухожилия короткой малоберцовой мышцы с V плюсневой костью представляет собой зубчатую, крайне неровную линию (см. рис. 2), амплитуда зубцов которой на всем протяжении соединения сухожилия

с костью колеблется от 84 до 218 мкм, а толщина статистически значимо больше значений этого показателя других энтезисов V плюсневой кости. Базофильные линии энтезисов исследуемых связок с V плюсневой костью менее зубчатые (см. рис. 3, 4), амплитуда зубцов не превышает 60 мкм, а толщина составляет 18–36 мкм. Единственным энтезисом, базофильная линия которого характеризуется сглаженностью на всем протяжении соединения и минимальной толщиной, является энтезис глубокой поперечной плюсневой связки (см. рис. 4, табл. 1).

Соотношение межклеточного матрикса и коллагеновых волокон на единицу площади в зонах обызвествленного и минерализованного волокнистого хряща энтезисов V плюсневой кости в ряде случаев имеет статистически значимые различия (табл. 2). Так, доля коллагеновых волокон соединения сухожилия короткой малоберцовой мышцы

Таблица 2. Доля коллагеновых волокон зон обызвествленного и минерализованного волокнистого хряща энтезисов V плюсневой кости трупов мужчин, %

Table 2. Proportion of collagen fibers in the zones of calcified and mineralized fibrocartilage of the entheses of the fifth metatarsal bone in male cadavers, %

Энтезис	Обызвествленный волокнистый хрящ	Минерализованный волокнистый хрящ	Уровень значимости различий
Сухожилие короткой малоберцовой мышцы	95,45 [93,50; 96,17]	85,22 [82,50; 88,12]	$p = 0,03$
Предплюсне-плюсневая и длинная подошвенные связки	96,20 [92,10; 97,40]	74,14 [68,10; 80,16]	$p = 0,01$
Плюсневая подошвенная связка	94,15 [88,50; 97,70]	88,05 [84,12; 93,10]	$p = 0,43$
Глубокая поперечная плюсневая связка	77,01 [68,76; 79,56]	85,34 [83,05; 86,14]	$p = 0,03$
Коллатеральная связка	94,66 [89,54; 96,12]	89,14 [88,08; 90,47]	$p = 0,31$

и комплекса предплюсне-плюсневой и длинной подошвенных связок с костью уменьшается от зоны обызвествленного в сторону минерализованного волокнистого хряща, противоположная картина характерна для энтезиса глубокой поперечной плюсневой связки с костью. Процентное содержание коллагеновых волокон в зонах обызвествленного и минерализованного волокнистых хрящей энтезисов плюсневой подошвенной и коллатеральной связок с костью значимо не различается. Следует отметить минимальные значения доли коллагеновых волокон в зоне обызвествленного волокнистого хряща энтезиса глубокой поперечной плюсневой связки и в зоне минерализованного волокнистого хряща энтезиса предплюсне-плюсневой и длинной подошвенной связок относительно других исследуемых энтезисов ($p < 0,05$) (см. табл. 2).

Обсуждение

Известными особенностями строения фиброзно-хрящевого энтезиса, приводящими к дегенеративным изменениям и способствующими снижению сопротивляемости и возможности к распределению напряжения, а следовательно, его повышенной хрупкости и уязвимости к переломам, являются увеличение толщины минерализованной зоны волокнистого хряща, истончение и прямолинейность базофильной линии, параллельный ход прямо расположенных коллагеновых волокон и уменьшение их доли, появление зрелых хондроцитов и увеличение количества их изогенных групп [19–21].

Проводя параллели между вышеуказанными признаками и найденными особенностями микроскопического строения энтезисов V плюсневой кости человека, можно констатировать наличие у них того или иного маркера предрасположенности к острым травмам при чрезмерных нагрузках либо ревматическим состояниям. Однако все они так или иначе обладают компенсаторными возможностями, судя по особенностям микроскопического строения. Прямое расположение коллагеновых волокон и множество изогенных групп хондроцитов в зоне обызвествленного волокнистого хряща энтезиса глубокой поперечной плюсневой связки и сглаженность его базофильной линии связаны с однонаправленным напряжением в этой связке, отсутствием необходимости в его распределении и нивелируются увеличением толщины зоны обызвествленного волокнистого хряща и доли коллагеновых волокон в зоне минерализованного волокнистого хряща.

Минимальная толщина зоны обызвествленного волокнистого хряща энтезиса комплекса предплюсне-плюсневой и длинной подошвенных связок с множеством зрелых хондроцитов и их изогенных групп и минимальной долей коллагена в зоне минерализованного волокнистого хряща компенсируется увеличением доли коллагена в зоне обызвествленного хряща, а зубчатость базофильной линии свидетельствует о прочности соединения. Хаотичность переплетения коллагеновых волокон в зонах плотной соединительной ткани и обызвествленного волокнистого хряща этого энтезиса является характерным соединением одновременно двух связок в одном месте кости, что свидетельствует о разнонаправленном распределении напряжения. Преобладание толщины зоны обызвествленного волокнистого хряща над толщиной минерализованного хряща с большей долей параллельно расположенных извитых коллагеновых волокон и единичными зрелыми хондроцитами при выраженной зубчатости базофильной линии энтезисов плюсневой подошвенной, коллатеральной связок и сухожилия короткой малоберцовой мышцы подтверждает их прочность и структурную готовность противостоять чрезмерной физической нагрузке.

Заключение

Проведенное исследование показало, что соединения всех четырех связок и сухожилия к V плюсневой кости по своей гистологической структуре являются фиброзно-хрящевыми энтезисами с четырьмя отдельными зонами. Найденные закономерности гистоструктуры энтезисов плюсневой подошвенной, коллатеральной связок и сухожилия короткой малоберцовой мышцы обусловлены их функцией и свидетельствуют об их потенциальной устойчивости к механической травме. Микроструктура комплекса предплюсне-плюсневой и длинной подошвенных связок, а также глубокой поперечной плюсневой связки, несмотря на свою неоднозначность, имеет «компенсирующие» характеристики, повышающие их прочность. Полученные результаты также свидетельствуют о существовании возрастных, половых, а возможно, и конституциональных закономерностей их строения, поскольку до сих пор непонятно, почему одни люди более подвержены травмам и развитию энтезопатий, а другие – нет, что, безусловно, требует дальнейшего, более детального изучения особенностей микроструктуры энтезисов V плюсневой кости с учетом указанных характеристик.

Список литературы / References

1. Apostolakos J., Durant T.J., Dwyer C.R., Russell R.P., Weinreb J.H., Alae F., Beitzel K., McCarthy M.B., Cote M.P., Mazzocca A.D. The enthesis: a review of the tendon-to-bone insertion. *Muscles Ligaments Tendons J.* 2014;4(3):333–342.
2. Aydin S.Z., Deodhar A. Are all entheses the same? *Rheumatology (Oxford)*. 2024;63(1):1–2. doi: 10.1093/rheumatology/kead288
3. Турчин Е.А., Григоровская А.В., Коструб А.А., Лябах А.А. Гистологические особенности строения плантарной пластинки капсулы плюснефалангового сустава. *Травма*. 2019;20(3):49–53. doi: 10.22141/1608-1706.3.20.2019.172093
4. Турчин Е.А., Григоровская А.В., Коструб А.А., Лябах А.А. Гистологические изменения энтезиса подошвенного апоневроза при подошвенном фасциите. *Травма*. 2019;20(5):41–45. doi: 10.22141/1608-1706.5.20.2019.185554
5. Турчин Е.А., Григоровская А.В., Коструб А.А., Лябах А.А. Histological changes of the planar aponeurosis enthesis in plantar fasciitis. *Travma = Trauma*. 2019; 20(5):41–45. [In Ukrainian]. doi: 10.22141/1608-1706.5.20.2019.185554
6. Benjamin M., Kaiser E., Milz S. Structure-function relationships in tendons: a review. *J. Anat.* 2008;212(3):211–228. doi: 10.1111/j.1469-7580.2008.00864.x
7. Benjamin M., McGonagle D. Entheses: tendon and ligament attachment sites. *Scand. J. Med. Sci. Sports*. 2009;19(4):520–527. doi: 10.1111/j.1600-0838.2009.00906.x
8. Nery C., Umans H., Baumfeld D. Etiology, clinical assessment, and surgical repair of plantar plate tears. *Semin. Musculoskelet. Radiol.* 2016;20(2):204–212. doi: 10.1055/s-0036-1581114
9. Becker S.K. Osteoarthritis, entheses, and long bone cross-sectional geometry in the Andes: Usage, history, and future directions. *Int. J. Paleopathol.* 2020;29:45–53. doi: 10.1016/j.ijpp.2019.08.005
10. Bryceland J.K., Powell A.J., Nunn T. Knee menisci. *Cartilage*. 2017;8(2):99–104. doi: 10.1177/1947603516654945
11. Coronel L., Mandl P., Miguel-Pérez M., Blasi J., D'Agostino M.A., Martinoli C., Bong D.A., Möller I. Characterization of digital annular pulleys and their entheses: an ultrasonographic study with anatomical and histological correlations. *Rheumatology (Oxford)*. 2024;63(11):3050–3055. doi: 10.1093/rheumatology/kead614
12. Coughlin M.J., Baumfeld D.S., Nery C. Second MTP joint instability: grading of the deformity and description of surgical repair of capsular insufficiency. *Phys. Sportsmed.* 2011;39(3):132–141. doi: 10.3810/psm.2011.09.1929
13. Deland J.T., Lee K.T., Sobel M., DiCarlo E.F. Anatomy of the plantar plate and its attachments in the lesser metatarsal phalangeal joint. *Foot Ankle Int.* 1995;16(8):480–486. doi: 10.1177/107110079501600804
14. Doty J.F., Coughlin M.J. Metatarsophalangeal joint instability of the lesser toes and plantar plate deficiency. *J. Am. Acad. Orthop. Surg.* 2014;22(4):235–245. doi: 10.5435/JAAOS-22-04-235
15. Finney F.T., McPheters A., Singer N.V., Scott J.C., Jepsen K.J., Holmes J.R., Talusan P.G. Microvasculature of the plantar plate using nano-computed tomography. *Foot Ankle Int.* 2019;40(4):457–464. doi: 10.1177/1071100718816292
16. Johnston 3rd R.B., Smith J., Daniels T. The plantar plate of the lesser toes: An anatomical study in human cadavers. *Foot Ankle Int.* 1994;15(5):276–282. doi: 10.1177/107110079401500508
17. Maas N.M.G., Grinten M., Bramer W.M., Kleinrensink G.-J. Metatarsophalangeal joint stability: a systematic review on the plantar plate of the lesser toes. *J. Foot Ankle Res.* 2016;9:32. doi: 10.1186/s13047-016-0165-2
18. Umans H., Srinivasan R., Elsinger E., Wilde G.E. MRI of lesser metatarsophalangeal joint plantar plate tears and associated adjacent interspace lesions. *Skeletal Radiol.* 2014;43(10):1361–1368. doi: 10.1007/s00256-014-1920-8
19. Баврина А.П. Современные правила использования методов описательной статистики в медико-биологических исследованиях. *Мед. альм.* 2020;63(2):95–105.
20. Баврина А.П. Modern rules for use descriptive statistics methods in medical and biological research. *Meditinskiy al'manakh = Medical Almanac*. 2020;63(2):95–105. [In Russian].
21. Bloebaum R.D., Kopp D.V. Remodeling capacity of calcified fibrocartilage of the hip. *Anat. Rec. A. Discov. Mol. Cell. Evol. Biol.* 2004;279(2):736–739. doi: 10.1002/ar.a.20066
22. Shea J.E., Hallows R.K., Bloebaum R.D. Experimental confirmation of the sheep model for studying the role of calcified fibrocartilage in hip fractures and tendon attachments. *Anat. Rec.* 2002;266(3):177–183. doi: 10.1002/ar.10051
23. Benjamin M., Toumi H., Suzuki D., Redman S., Emery P., McGonagle D. Microdamage and altered vascularity at the enthesis-bone interface provides an anatomic explanation for bone involvement in the HLA-B27-associated spondylarthritides and allied disorders. *Arthritis Rheum.* 2007;56(1):224–233. doi: 10.1002/art.22290

Сведения об авторах:

Дуков Денис Владимирович, ORCID: 0000-0002-6002-0009, e-mail: denis_garant@mail.ru
Русских Андрей Николаевич, д.м.н., ORCID: 0000-0002-2548-8044, e-mail: chegevara-84@mail.ru
Шабоха Анна Дмитриевна, к.м.н., ORCID: 0000-0002-3462-962X, e-mail: tat_yak@mail.ru
Алябьев Федор Валерьевич, д.м.н., проф., ORCID: 0000-0003-4438-1717, e-mail: alfedval@mail.ru
Хоржевский Владимир Алексеевич, к.м.н., ORCID: 0000-0002-9196-7246, e-mail: vladpatholog@yandex.ru
Макаров Александр Федорович, к.м.н., ORCID: 0009-0000-6190-049X, e-mail: afmakaroff@gmail.com
Яремин Борис Иванович, к.м.н., ORCID: 0000-000105889-8675, e-mail: boris@yarem.in

Information about the authors:

Denis V. Dukov, ORCID: 0000-0002-6002-0009, e-mail: denis_garant@mail.ru
Andrey N. Russkikh, doctor of medical sciences, ORCID: 0000-0002-2548-8044, e-mail: chegevara-84@mail.ru
Anna D. Shabokha, candidate of medical sciences, ORCID: 0000-0002-3462-962X, e-mail: tat_yak@mail.ru
Fedor V. Alyabyev, doctor of medical sciences, professor, ORCID: 0000-0003-4438-1717, e-mail: alfedval@mail.ru
Vladimir A. Khorzhevsky, candidate of medical sciences, ORCID: 0000-0002-9196-7246, e-mail: vladpatholog@yandex.ru
Alexandr F. Makarov, candidate of medical sciences, ORCID: 0009-0000-6190-049X, e-mail: afmakaroff@gmail.com
Boris I. Yaremin, candidate of medical sciences, ORCID: 0000-000105889-8675, e-mail: boris@yarem.in

Поступила в редакцию 30.08.2024
После доработки 29.10.2024
После повторной доработки 05.01.2025
Принята к публикации 05.01.2025

Received 30.08.2024
Revision received 29.10.2024
Second revision received 05.01.2025
Accepted 05.01.2025