

Турчин О.А., Григоровська А.В., Коструб О.О., Лябах А.П.
ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України», м. Київ, Україна

Гістологічні особливості будови плантарної пластинки капсули плеснофалангового суглоба

Резюме. Мета роботи: аналіз результатів гістологічного дослідження плантарної пластинки капсули плеснофалангового суглоба; виявлення особливостей будови, характерних для структури ентезису. **Матеріали та методи.** Досліджено 11 зразків тканин плантарної пластинки капсули 2–4-го плеснофалангових суглобів, шість із яких були взяті у двох свіжих травматичних ампутованих кінцівках. Інші п'ять зразків отримали при екзартикуляції другого пальця у пацієнтів із крайнім ступенем фіксованої молоткоподібної деформації. Середній вік пацієнтів становив $65,28 \pm 10,32$ (45–74) року, чоловіків було 3, жінок — 4. Для гістологічного дослідження відбирали фрагменти сухожильно-кісткового з'єднання, які проходили звичайну гістологічну обробку. Препарати досліджували в світлі, що проходить через систему лінз мікроскопа OLYMPUS CX-41. Градації вираженості морфологічних показників оцінювали згідно з візуальною аналоговою шкалою від низького до високого ступеня при збільшенні $\times 100$. **Результати.** У досліджуваних зразках плантарної пластинки виявили характерні гістологічні ознаки, властиві для структури фіброзно-хрящового ентезису. У місці кріплення сполучної тканини до суглобової поверхні спостерігалась поступова трансформація фіброзної тканини в мінералізовану кісткову тканину, що мікроскопічно характеризувалось зональністю цього переходу. Ентезис плантарної пластинки мав чотири окремі зони: перша зона представлена щільною оформленою сполучною тканиною; друга зона — волокнистим хрящем без ознак звапнення; третя — мінералізованим волокнистим хрящем; четверта — власне кісткою. **Висновки.** Описана гістологічна будова ділянок кріплення плантарної пластинки капсули плеснофалангового суглоба до головок плеснових кісток відповідає типовій структурі фіброзно-хрящового ентезису, характерною ознакою якого є наявність волокнистого хряща, локалізація переважно біля епіфізів, обмеженість зони прикріплення.

Ключові слова: плантарна пластинка; метатарзалгія; стопа; ентезис; гістологічне дослідження

Вступ

Плантарна пластинка (ПП) капсули плеснофалангового суглоба (ПлФс) є основною структурою, що стабілізує ПлФс. Вона перешкоджає перерозгинанню проксимальної фаланги в ПлФс та захищає його від перевантаження з кінця середньої фази кроку до відштовхування стопи [1, 2].

За даними більшості авторів, тривале циклічне перевантаження ПП із розвитком у ній дегенеративних змін та розриву є причиною для виникнення больового синдрому при метатарзалгії та нестабільності ПлФс [1–3].

Анатомічно ПП являє собою широку, міцну, але гнучку стрічку прямокутної або трапецієподібної форми та є точкою міцного кріплення сухожилків, зв'язок і

дистальних волокон плантарного апоневрозу. Через це деякі дослідники вважають її ентезисом [4, 5]. За даними літератури, окремі зони ентезису ПП відрізняються за клітинним складом, мають різні механічні властивості та функціональне призначення [5].

Анатомо-топографічні параметри ПП досліджені детально, у той час як гістологічні особливості будови недостатньо висвітлені в сучасній літературі [1, 4].

Поглиблене дослідження гістології цього утворення сприятиме уточненню патофізіології та механізму болі при метатарзалгії.

Мета роботи — аналіз результатів гістологічного дослідження плантарної пластинки капсули плеснофалангового суглоба; виявлення особливостей будови, характерних для структури ентезису.

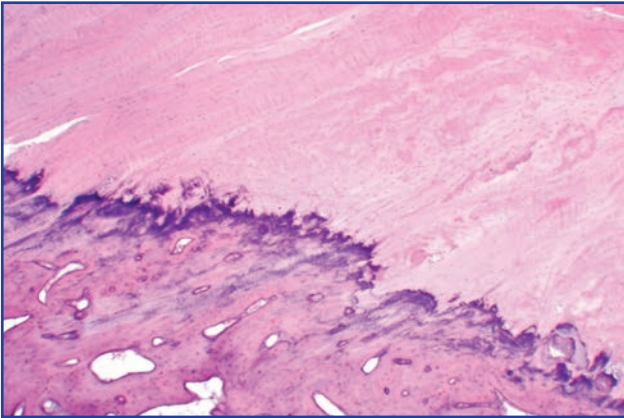


Рисунок 1. Кістково-сухожилкове з'єднання передбачає поступовий перехід від власне тканини сухожилка до пластинчастої кістки і складається з 4 зон: фіброзної тканини, немінералізованої хрящової тканини, фіброзно-хрящової зони з ознаками звапнення і кісткової тканини

Матеріали та методи

Матеріалом для дослідження стали 11 зразків тканин ПП капсули 2–4-го ПлФс, шість із яких були взяті у двох свіжих травматичних ампутованих кінцівках. Інші п'ять зразків отримали при екзартикуляції другого пальця у пацієнтів із крайнім ступенем фіксованої молоткоподібної деформації. Середній вік пацієнтів становив $65,28 \pm 10,32$ (45–74) року, чоловіків було 3, жінок — 4. Використання даних з історій хвороби проведено з урахуванням вимог комітету з біоетики ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України».

Для гістологічного дослідження відбирали фрагменти сухожильно-кісткового з'єднання, які проходили звичайну гістологічну обробку (зразки тканини фіксували в 10% розчині нейтрального формаліну

(рН 7,4) протягом 24 годин). Після фіксації у формаліні зразки промивали в проточній воді, вирізали відповідні ділянки. Препарати зневоднювали шляхом проводки через спирти зростаючої міцності та заливали в парафін; з парафінових блоків на ротативному мікротомі виготовляли серійні гістологічні зрізи завтовшки 5 мкм, які потім забарвлювали гематоксилином і еозином. Препарати досліджували в світлі, що проходить через систему лінз мікроскопа OLYMPUS CX-41. Градації вираженості морфологічних показників оцінювали згідно з візуальною аналоговою шкалою від низького до високого ступеня при збільшенні $\times 100$.

Результати

У досліджуваних зразках ПП ПлФс визначали інтеграцію щільної оформленої сполучної тканини в кістку, тобто характерні гістологічні ознаки, властиві для структури ентезису. У місці кріплення сполучної тканини до суглобової поверхні спостерігалась поступова трансформація фіброзної тканини в мінералізовану кісткову тканину, що мікроскопічно характеризувалось зональністю цього переходу (рис. 1).

Типовий фіброзно-хрящовий ентезис має чотири окремі зони, які структурно утворюють безперервний перехід від сполучної до кісткової тканини (рис. 2А). Перша зона — збагачена фібробластами щільна оформлена сполучна тканина; щільні тяжі фібробластів орієнтовані переважно в одній площині (рис. 2Б).

Друга зона — волокнистий хрящ без ознак звапнення або вторинної осифікації, з численними аваскулярними ділянками. Основу даної зони складають зрілі хондроцити та міжклітинний колагеновий матрикс (рис. 3А). Описана зона відмежована від наступної базофільною лінією, що відокремлює мінералізовані та немінералізовані зони волокнистого хряща (рис. 3Б, В).

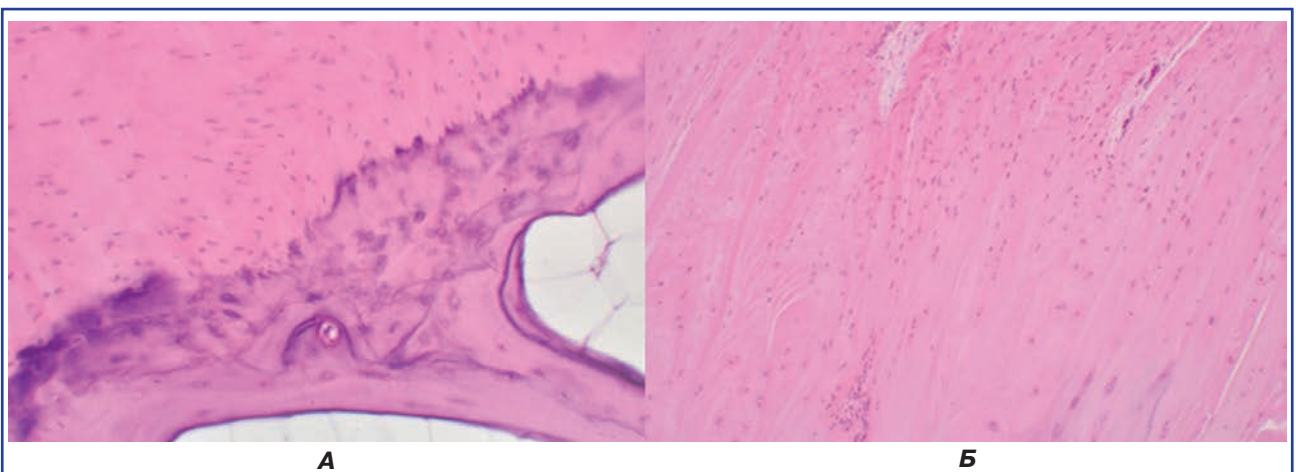


Рисунок 2. А — зональність трансформації щільної оформленої сполучної тканини плантарної пластинки в спонгіозу головки плеснової кістки; Б — зріла сполучна тканина являє собою щільні тяжі фібробластів, орієнтовані в одній площині; міжклітинна речовина — колагенові пучки, в оформленій сполучній тканині вони здебільшого однонаправлені, їх об'єм переважає над клітинними елементами. Між паралельно орієнтованими колагеновими волокнами розміщені фіброцити

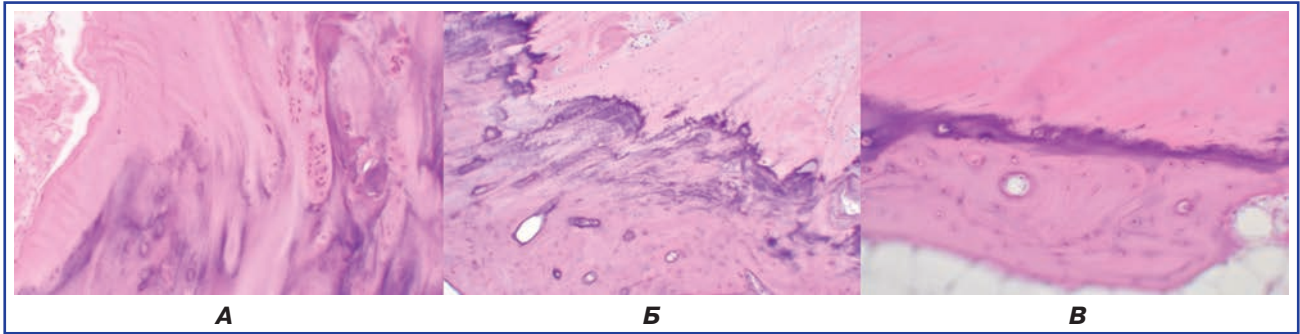


Рисунок 3. А — на сухожильному боці демаркаційної лінії спостерігається помірна проліферація хондроцитів, а сухожильні волокна можуть поширюватись до остеохондрального переходу; Б — розмежувальна лінія в структурі ентезису, як правило, демонструє більш плавну трансформацію хряща у кісткові балки, ніж подібний перехід однієї тканини в іншу на остеохондральному з'єднанні; В — вираженість звапнення кластерів хондроцитів може широко варіювати і являє собою смугу різко базофільного забарвлення

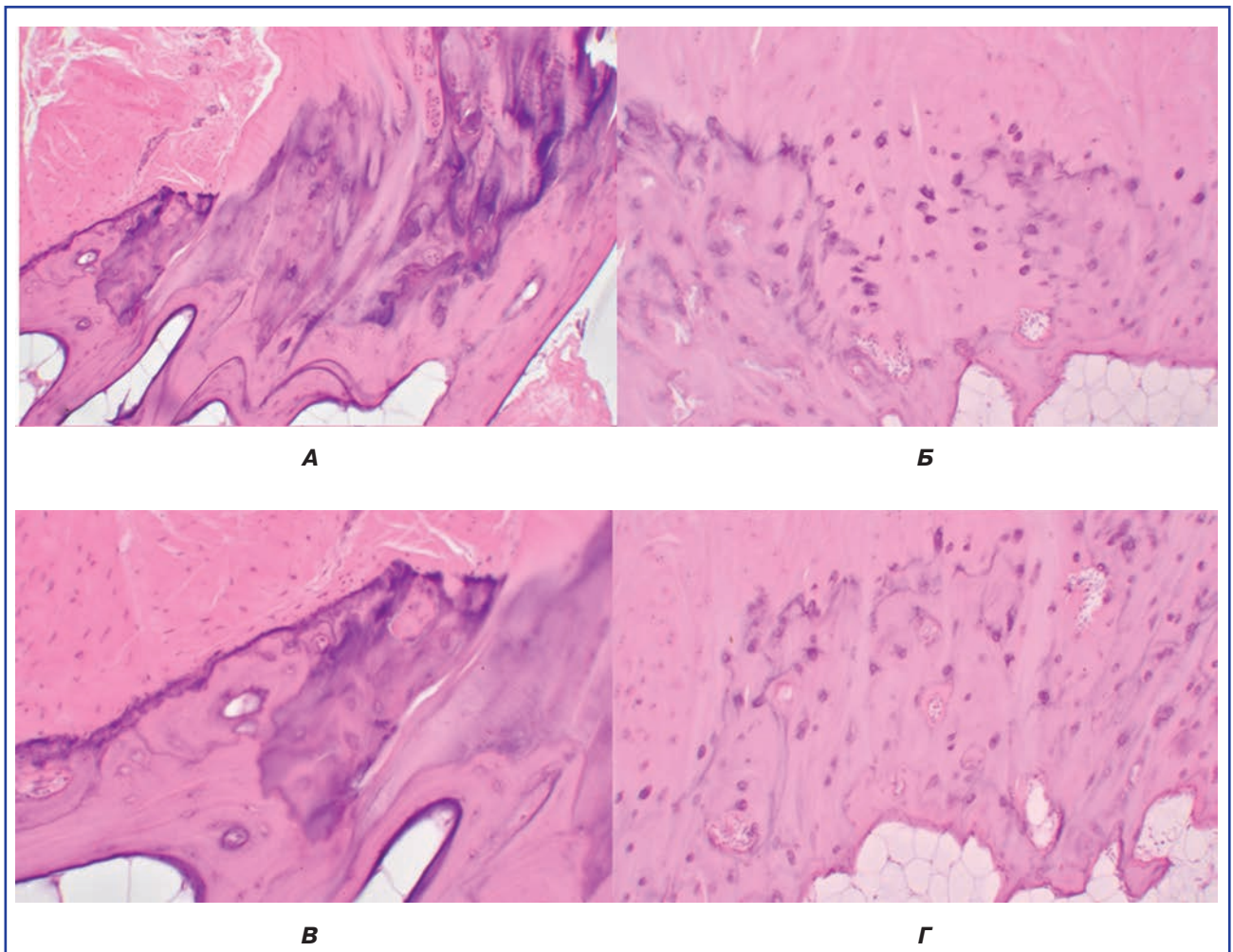


Рисунок 4. А — мінералізований фіброзно-хрящовий шар відокремлений від підлеглої кісткової тканини однією або декількома базофільними лініями (лінія цементації); Б — межа між фіброзним хрящем з ознаками звапнення і субхондральною кістковою тканиною виражена нечітко; В — під час росту кісткової тканини колагенові волокна сухожилка проростають глибше в підлеглу спонгіозу; Г — остеогенез у сухожильно-кістковому з'єднанні дозволяє здійснити плавний механічний перехід щільної оформленої сполучної тканини в спонгіозу

Третя зона — мінералізований волокнистий хрящ. Це аваскулярна зона, представлена хрящовою тканиною з ознаками звапнення, основну клітинну популяцію в якій становлять хондроцити і фіброцити серед колагенових пучків, орієнтованих переважно в одній площині (рис. 4А, Б). Ця зона являє собою справжній перехід тканини сухожилка до кістки і створює межу з субхондральною спонгіозою. Четверта зона представлена власне кістковою тканиною (рис. 4В, Г).

Обговорення

Сухожилок, зв'язка, апоневроз або суглобова капсула може кріпитися до кістки різними способами, залежно від місця прикріплення — епіфіза або діяфіза. Фіброзно-хрящовий ентезис — анатомічна структура складної будови, що представляє один із варіантів прикріплення щільної оформленої сполучної тканини (сухожилля, зв'язки, фасції або капсули) до поверхні кістки, переважно в місцях, де немає окістя, наприклад у ділянках епіфізів [6]. Ентезис складається із 4 зон: щільної волокнистої сполучної тканини, некальцифікованого волокнистого хряща, кальцифікованого волокнистого хряща та кістки [7]. Волокна фіброзної тканини прикріплюються безпосередньо до кістки або окістя головним чином через шар волокнистого хряща, в якому колагенові волокна зв'язки з'єднуються з аморфною міжклітинною речовиною, а фібробласти інкапсулюються та стають схожими на хондроцити. Така перехідна зона характерна для місця прикріплення синовіальної оболонки до периферії суглобового хряща. Підшовна поверхня ПП, звужуючись дистально, стає більше подібна до зв'язки, складаючись із більшої кількості фібробластів та меншої хондроцитів. Фіброзно-хрящові ентезиси присутні на епіфізах довгих кісток і на дрібних кістках кистей та стоп. N. Maas та ін. вважають, що фіброзно-хрящова будова ПП подібна до будови меніска та annulus fibrosis міжхребцевих дисків [5].

У місці кріплення сухожилка до кістки пучки колагенових волокон (шарпеевські), орієнтовані у напрямку найбільшої напруги, врастають у кістку. В такому випадку між волокнами колагену розташовані остеобласти, які продовжують продукувати матрикс кісткової тканини, чим забезпечують можливість апозиційного росту кістки та функцію окістя в зоні прикріплення [5, 8].

J.T. Deland та ін. не виявили еластичних волокон, а R.B. 3rd Johnston, навпаки, виявив невелику концентрацію еластину [9, 10]. У нашому дослідженні еластичні волокна не були виявлені.

Колагенові волокна центральної та периферичної частин ПП орієнтовані поздовжньо та є дистальним продовженням волокон підшовного апоневрозу, за рахунок чого забезпечується «лебідковий» механізм у кожному ПлФс. На рівні глибокої підшовної міжплезнової зв'язки волокна набувають поперечної орієнтації [5].

Нещодавніми дослідженнями було показано, що кровопостачання ПП відбувається за рахунок ото-

чуючих м'яких тканин проксимально та дистально, у той час як центральна частина аваскулярна [11]. Ми не виявили васкуляризації ПП, більша її частина представлена аваскулярними ділянками. Слабкість васкуляризації ентезиса сповільнює його відновлення при хронічному перенавантаженні. Цей факт може бути важливим для подальшого розуміння патофізіології ПП.

Висновки

Описана гістологічна будова ділянок кріплення ПП капсули ПлФс до головок плеснових кісток відповідає типовій структурі фіброзно-хрящового ентезису, характерною ознакою якого є наявність волокнистого хряща, локалізація переважно біля епіфізів, обмеженість зони прикріплення. Пучки сухожильних колагенових волокон проростають в хрящову частину ентезису, дифузно поширюючись у мінералізованому волокнистому хрящі. Шарпеевські волокна безпосередньо проникають в компактну кісткову тканину кортикального шару, інтегруючись з кістковими трабекулами. Немінералізована та мінералізована частини фіброзного хряща розмежовані чіткою демаркаційною лінією, а межа між фіброзним хрящем з ознаками звапнення і субхондральною кістковою тканиною виражена нечітко. За рахунок особливостей будови ПП здатна витримувати навантаження в різних напрямках.

Етичний аспект. Усі процедури, що проводилися в дослідженні за участю пацієнтів, відповідали етичним стандартам інституційного та/або національного дослідницького комітету, а також Гельсінської декларації 1964 року і її більш пізнім змінам або порівнянням етичним стандартам.

Конфлікт інтересів. Дана публікація не викликає будь-якого конфлікту між авторами, не була і не буде предметом комерційної зацікавленості чи винагороди в жодній формі.

Список літератури

- 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). — P. 235-245. doi: 10.5435/JAAOS-22-04-235.
- 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). — P. 1361-1368. doi: 10.1007/s00256-014-1920-8.
- 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). — P. 132-41. doi: 10.3810/psm.2011.09.1929.
- Nery C., Umans H., Baumfeld D. *Etiology, Clinical Assessment, and Surgical Repair of Plantar Plate Tears* // *Seminars in Musculoskeletal Radiology.* — 2016. — 20(2). — P. 204-212. <http://dx.doi.org/10.1055/s-0036-1581114>.

5. 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.

6. Apostolakis J., Durant T., Dwyer C., Russell R. et al. The enthesis: a review of the tendon-to-bone insertion // *Muscles Ligaments Tendons J.* — 2014. — 4(3). — P. 333-342. PMID: 25489552.

7. Benjamin M., McGonagle D. Entheses: tendon and ligament attachment sites // *Scand. J. Med. Sci. Sports.* — 2009. — 19. — P. 520-527. doi: 10.1111/j.1600-0838.2009.00906.x.

8. Benjamin M., Kaiser E., Milz S. Structure-function relationships in tendons: a review // *J. Anat.* — 2008. — 212(3). — P. 211-228. doi: 10.1111/j.1469-7580.2008.00864.x.

9. 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). — P. 480-6. DOI: 10.1177/107110079501600804.

10. 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). — P. 276-82. DOI: 10.1177/107110079401500508.

11. Finney F.T., McPheters A., Singer N.V. et al. Microvasculature of the Plantar Plate Using Nano-Computed Tomography // *Foot Ankle Int.* — 2018. — 19. — 1071100718816292. doi: 10.1177/1071100718816292.

Отримано 26.03.2019 ■

Турчин Е.А., Григоровская А.В., Коструб А.А., Лябах А.П.

ГУ «Институт травматологии и ортопедии НАМН Украины», г. Киев, Украина

Гистологические особенности строения плантарной пластинки капсулы плюснефалангового сустава

Резюме. Цель работы: анализ результатов гистологического исследования плантарной пластинки капсулы плюснефалангового сустава; определение особенностей строения, характерных для структуры энтезиса. **Материалы и методы.** Исследовано 11 образцов тканей плантарной пластинки капсулы 2–4-го плюснефаланговых суставов, шесть из которых были взяты у двух свежих травматических ампутированных конечностей. Остальные пять образцов получены при экзартикуляции второго пальца у пациентов с крайней степенью фиксированной молоткообразной деформации. Средний возраст пациентов составил $65,28 \pm 10,32$ (45–74) года, мужчин было 3, женщин — 4. Для гистологического исследования отбирали фрагменты сухожильно-костного соединения, которые проходили обычную гистологическую обработку. Препараты исследовали в свете, который проходит через систему линз микроскопа OLYMPUS CX-41. Градации выраженности морфологических показателей оценивали согласно визуальной аналоговой шкале от низкой до высокой степени при увеличении $\times 100$. **Результаты.** В исследованных образцах плантарной

пластинки выявили характерные гистологические признаки, свойственные структуре фиброзно-хрящевого энтезиса. В месте крепления соединительной ткани к суставной поверхности наблюдали постепенную трансформацию фиброзной ткани в минерализованную костную ткань, что микроскопически характеризовалось зональностью этого перехода. Энтезис плантарной пластинки имел четыре зоны: первая зона представлена плотной оформленной соединительной тканью; вторая зона — волокнистым хрящом без признаков обызвествления; третья — минерализованным волокнистым хрящом; четвертая — собственно костью. **Выводы.** Описанное гистологическое строение области крепления плантарной пластинки капсулы плюснефалангового сустава к головкам плюсневых костей соответствует структуре фиброзно-хрящевого энтезиса, характерным признаком которого является наличие волокнистого хряща, локализация преимущественно возле эпифизов, ограничение зоны прикрепления.

Ключевые слова: плантарная пластинка; метатарзалгия; стопа; энтезис; гистологическое исследование

O.A. Turchin, A.V. Grigorovskaya, O.O. Kostrub, A.P. Liabakh

State Institution "Institute of Traumatology and Orthopaedics of NAMS of Ukraine", Kyiv, Ukraine

Histological features of metatarsophalangeal plantar plate structure

Abstract. Background. Objective was to analyze the plantar plate histology results, to reveal the features of the plantar plate entheses structure. **Materials and methods.** Eleven samples of metatarsophalangeal joint plantar plates were obtained for histology assessment: 6 plantar plates from fresh traumatic amputated limb, five after second toe exarticulation. Three persons were males, 4 — females, the average age of patients was 65.28 ± 10.32 years (range 45–74). Paraffin sections (5 microns) were analyzed with bright-field light microscopy (Olympus CX41). Grades of severity of morphological signs were evaluated by the visual analogue scale from low to high grade, with $100\times$. **Results.** The characteristic histological signs were revealed in the structure of fibrocartilaginous entheses. There was a gradual transformation of

fibrous tissue into mineralized bone tissue that microscopically was characterized by the zonation of this transition. The plantar plate entheses had four zones: zone 1 — dense connective tissue, zone 2 — non-calcified fibrous cartilage, zone 3 — calcified fibrous cartilage, zone 4 — the bone. **Conclusions.** The histological structure of the attachment of the plantar plate of metatarsophalangeal joint capsule to the heads of metatarsal bones corresponds to the typical structure of the fibrocartilaginous entheses, the characteristic feature of which is the presence of fibrous cartilage, localization predominantly near epiphyses, and the limited attachment area.

Keywords: plantar plate; metatarsalgia; foot; entheses; histological examination