

Олена Петрівна Шармазанова<sup>1</sup>,  
Юлія Анатоліївна Миронова<sup>2</sup>,  
Юрій Миколайович Коваленко<sup>3</sup>,  
Сергій Володимирович Балашов<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Харківська медична академія  
післядипломної освіти,

<sup>2</sup>КРУ КТМО «Університетська  
клініка»,

<sup>3</sup>Національна медична академія  
післядипломної освіти  
ім. П.Л. Шупика, Київ,

<sup>4</sup>Центр рентгенівських  
технологій, Київ

## Діагностика пошкоджень зон росту кісток за допомогою цифрової мікрофокусної рентгенографії (експериментальне дослідження)

Diagnosis of bone growth zones injuries using  
digital microfocus radiography  
(experimental research)

**Цель работы:** Оценка возможности визуализации травматических повреждений физарных зон локтевого сустава с помощью цифровой микрофокусной рентгенографии в эксперименте.

**Материалы и методы:** Использовались цифровой рентгенодиагностический комплекс, микрофокусный рентгенаппарат и тканеэквивалентный фантом с моделированными переломами физарной зоны локтевого сустава.

**Результаты:** На первом этапе исследования выполнялась цифровая рентгенография тканеэквивалентного фантома, которая не позволила увидеть на цифровой рентгенограмме перелом физарной зоны локтевого сустава. На втором этапе была выполнена цифровая микрофокусная рентгенография поврежденной области без увеличения, а также с 7-кратным первичным увеличением изображения, которая позволила визуализировать линию перелома физарной зоны. Полученные результаты повторялись в серии экспериментов, а также были подтверждены при морфологическом исследовании.

**Выводы:** Применение цифровой микрофокусной рентгенографии в режиме увеличения в диагностике травматических повреждений физарной зоны локтевого сустава значительно повышает вероятность постановки правильного диагноза.

**Ключевые слова:** травматические повреждения, зона роста, цифровая микрофокусная рентгенография.

**Objective:** To evaluate experimentally the imaging capabilities of traumatic injuries of the elbow growth zones using digital microfocus radiography.

**Material and Methods:** Digital x-ray diagnostic complex, microfocus x-ray unit and tissue-equivalent phantom with simulated fractures of the growth zone of the elbow joint were used.

**Results:** Digital radiography of tissue-equivalent phantom was done as the first stage of the investigation, which did not allow seeing on the digital radiograph fracture of the olecranon growth zone. Digital microfocus radiography of the damaged area without magnification and with a 7-fold primary magnification was done as the second step, which allowed visualization of the growth zone fracture line. The results were repeated in a series of experiments and were confirmed by morphological study.

**Conclusion:** The use of magnified microfocus radiography in diagnosis of olecranon growth zone injuries significantly increases the probability of correct diagnosis.

**Key words:** injuries, growth zone, digital microfocus radiography.

**Мета роботи:** Оцінка можливості візуалізації травматичних пошкоджень фізарних зон ліктьового суглоба за допомогою цифрової мікрофокусної рентгенографії в експерименті.

**Матеріали і методи:** Використовували цифровий рентгенодіагностичний комплекс, мікрофокусний рентгенапарат і тканиноеквівалентний фантом зі змодельованими переломами фізарної зони ліктьового суглоба.

**Результати:** На першому етапі дослідження виконувалась цифрова рентгенографія тканиноеквівалентного фантома, яка не дозволила визначити перелом фізарної зони ліктьового суглоба. На другому етапі була виконана цифрова мікрофокусна рентгенографія пошкодженої ділянки без збільшення, а також із 7-кратним первинним збільшенням зображення, яка дозволила візуалізувати лінію перелому фізарної зони. Отримані результати повторювались у серії експериментів, а також були підтверджені при морфологічному дослідженні.

**Висновки:** Застосування цифрової мікрофокусної рентгенографії в режимі збільшення значно підвищує вірогідність постановки правильного діагнозу при травматичних пошкодженнях фізарної зони ліктьового суглоба.

**Ключові слова:** травматичні пошкодження, зона росту, цифрова мікрофокусна рентгенографія.

Травматичні ушкодження кісток і суглобів як у дорослих, так і у дітей займають провідне місце серед усіх невідкладних станів [1]. Серед загальної кількості травм дитяча травма становить 25–30%.

Для дітей характерні певні локалізації та види травматичних ушкоджень кісток і суглобів. Основною відмінністю дитячої кісткової системи від дорослої є наявність зони росту або фізарної зони,

що складається з проліферуючих клітин хряща між метафізом і епіфізом зростаючої кістки. Цій ділянці не вистачає притаманної кістковій тканині механічної міцності, тому ця ділянка є більш сприйнятливою до травматичних ушкоджень, ніж навколишня осифікована тканина [1]. Найчастіше пошкодження фізарної зони відбувається на межі осифікованої та неосифікованої тканини у вигляді відшарування хрящової тканини від осифікованої поверхні метафіза [2].

Пошкодження верхніх кінцівок у дітей складають 69–71% [3]. Серед них пошкодження ліктьового суглоба займають друге місце після дистального відділу передпліччя і складають 20–25% [4], при цьому частота ушкоджень фізарних зон кісток ліктьового суглоба становить, за даними різних авторів, від 6 до 12% від усіх травматичних ушкоджень скелета в дитячому віці [5, 6].

Діагностика при травмі значно утруднена через анатомічні та рентгенологічні особливості будови дитячого ліктьового суглоба. Недостатність анамнезу, добре виражена підшкірна жирова клітковина і відсутність зміщення відламків при підокісних переломах ускладнюють розпізнавання і призводять до діагностичних помилок. Нерідко при наявності перелому ставлять діагноз забиття і, навпаки, при відсутності пошкоджень кісткової тканини необґрунтовано ставлять діагноз остеоепіфізеолізу без зміщення. В результаті близько 50% дітей без переломів кісток отримують необґрунтоване лікування, тоді як близько 30% дітей з переломами кісток його не отримують [7].

Помилки діагностики (частіше спостерігаються у дітей до 3-річного віку) і лікування часто призводять до обмеження рухів, уповільнення росту кістки, деформації кінцівки, інвалідизації пацієнта. За даними зарубіжних авторів нерозпізнаний остеоепіфізеоліз (Salter-Harris III) може призвести до повного закриття зони росту і, як наслідок, до варусної або вальгусної деформації кінцівки. У дітей молодшого віку велика частина епіфіза представлена хрящем і є рентгенонеконтрастною, ядро окостеніння утворює тінь у вигляді невеликої зернини, таким чином, рентгенографічно діагноз пошкодження зони росту (епіфізеоліз) можна поставити, ґрунтуючись лише на непрямих ознаках, таких як клиноподібне розширення зони росту і зсув ядра скостеніння (епіфіза) щодо метафіза. Якщо ж травматичне ушкодження пред-

ставлено у вигляді чистого епіфізеолізу без зміщення або ж ядро скостеніння ще не візуалізується, то такий діагноз ставиться тільки клінічно, без об'єктивного підтвердження променевими методами дослідження.

Досить важко інтерпретувати рентгенограми щодо перелому в тих відділах кістки, де є неосифікована тканина, оскільки виявлення пошкодження фізарної зони утруднено через її рентгенонеконтрастність, а отже, рентгенографія не завжди допомагає при травмах кінцівок у дітей, зокрема при травмах ліктьового суглоба.

Метою дослідження є оцінка можливості візуалізації травматичних пошкоджень фізарних зон ліктьового суглоба за допомогою цифрової мікрофокусної рентгенографії в експерименті.

## Методика дослідження

Перелом зони росту був промодельований на 8 передніх кінцівках мертвонароджених цуценят (2) і козенят (2) на ділянці ліктьового суглоба (8 серій експериментальних досліджень). Моделювання ізольованого перелому зони росту було проведено згідно з описом Jaramillo D., Kammen V.F., Shapiro F. (2000) [8]: після розрізу шкірного покриву по задній поверхні дистальної третини передпліччя і ліктьового суглоба і сепарації м'язового шару вручну було застосовано латеральне відхилення ліктьового відростка з фіксацією передпліччя.

Методи експериментальної роботи з тваринами відповідали загальноприйнятим нормам і правилам, передбаченим «Європейською конвенцією з нагляду і захисту хребетних тварин, які використовуються в експериментальних та інших наукових цілях» (Страсбург, 1986 р.), Директивою Ради Європейської Співдружності від 24.11.1986 р. і розпорядженням МОЗ України № 32 від 22.02.1988 р.

Рентгенологічне дослідження проводили на цифровому рентгенапараті "Villa Sistemi Medicali" з фокусом променевої трубки 6 мм (фізико-технічні характеристики: напруга 60 кВ, струм — 100 мА, час — 0,08 с.) і цифровому мікрофокусному апараті «Пардус-травма» з розміром фокусної плями 0,3 мм (фізико-технічні характеристики: напруга 50 кВ, струм — 185 мкА, час — 1,8 с.). Дослідження проводили до моделювання перелому (рисунок 1) і одразу після його здійснення [9].

## Результати та їх обговорення

Після нанесення перелому виконувалася цифрова рентгенографія ліктьового суглоба в двох взаємно-перпендикулярних проекціях з використанням приймача роздільною здатністю 4 пари лін./мм. При цьому на цифрових рентгенограмах (рисунок 2) слабо візуалізувались лінії перелому ліктьового відростка (чорна стрілка) і лінія перелому ядра скостеніння ліктьового відростка паралельна ростковій зоні (біла стрілка), пошкоджен-



Рисунок 1. Цифрова рентгенограма в бічній проекції з роздільною здатністю приймача 4 п.л./мм ліктьового суглоба козеняти перед моделюванням перелому

Fig. 1. Digital radiography in lateral projection with resolution of the receiver 4 l.p. / mm of the elbow joint before fracture simulation



Рисунок 2. Цифрова рентгенограма в бічній проекції з роздільною здатністю приймача 4 п.л./мм ліктьового суглоба козеняти з модельованим переломом ліктьового відростка: чорна стрілка — лінія перелому ліктьового відростка; біла стрілка — лінія перелому ядра скостеніння ліктьового відростка; зона росту клиноподібної форми

Fig. 2. Digital radiography in lateral projection with resolution 4 l.p. / mm of the elbow joint of a kid with a simulated fracture of the olecranon process; black arrow - the line of fracture of the olecranon process; white arrow - fracture line of ossification nucleus of the olecranon process; wedge-shaped growth zone

ня зони росту можна запідозрити за її трохі клиноподібною формою.

Далі виконувалася цифрова мікрофокусна рентгенографія пошкодженої ділянки без збільшення зображення (рисунок 3), яка практично не відрізнялась від цифрової рентгенограми (див. рисунок 2), проте лінії переломів визначались більш чітко.

На цифровій мікрофокусній рентгенограмі при 7-кратному первинному збільшенні зображення (рисунок 4), крім ліній переломів кісткової тканини, чітко візуалізувалась лінія просвітління на



Рисунок 3. Цифрова мікрофокусна рентгенограма в бічній проекції того ж ліктьового суглоба козеняти з модельованим переломом зони росту ліктьового відростка, що на рисунках 1 і 2 без збільшення зображення: чорна стрілка — лінія перелому ліктьового відростка; біла стрілка — лінія перелому ядра скостеніння ліктьового відростка; зона росту клиноподібної форми

Fig. 3. Digital microfocus radiography in the lateral projection of the same elbow joint of the kid with a simulated fracture of the olecranon growth areas (Fig. 1 and 2 without the image magnification); black arrow - the line of fracture of the olecranon process, white arrow - fracture line of the ossification nucleus of the olecranon process; wedge-shaped growth zone

межі осифікованої тканини і хрящової неосифікованої тканини фізичної зони (подвійна біла стрілка), яка розцінювалась як пряма ознака травматичного пошкодження зони росту і дрібні кісткові фрагменти на рівні розширеної частини фізичної зони.

Аналогічні дані були отримані в 7 із 8 модельованих переломів (87,5%) ліктьового суглоба. Для об'єктивізації результатів рентгенографії було проведено морфологічне дослідження пошкоджених ділянок, яке підтвердило наявність пошкодження зон росту (рисунок 5).

Візуалізація пошкодження зони росту у вигляді лінії просвітлення на межі осифікованої та неосифікованої тканин пояснюється фізико-технічними характеристиками мікрофокусної рентгенографії. Об'єкт зйомки розташовується на певній відстані як від фокусної плями джерела випромінювання (фокусна відстань), так і від вхідного вікна приймача рентгенівського зображення (рисунок 6).

Співвідношення зазначених відстаней визначає коефіцієнт збільшення зображення ( $m_{onm}$ ), який також визначається за формулою для розрахунку роздільної здатності приймача

$$m_{onm} = \frac{(fR_n)^2 + 1}{(fR_n)^2}, \quad (1)$$

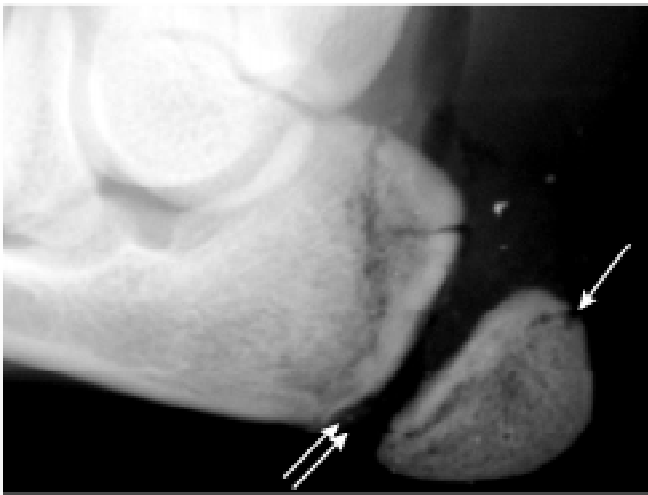


Рисунок 4. Цифрова мікрофокусна рентгенограма ліктьового суглоба з 7-кратним збільшенням зображення: чорні стрілки — лінії перелому ліктьового відростка; біла стрілка — лінія перелому ядра скостеніння ліктьового відростка; зона росту клиноподібної форми; подвійна біла стрілка — лінія перелому росткової зони

Fig. 4. Digital microfocus radiography of the elbow joint with a 7-fold image magnification: black arrows - the fracture line of the olecranon process; white arrow - fracture line of ossification nucleus of the olecranon process; wedge-shaped growth zone; white double arrow - fracture line of the growth zone



Рисунок 5. Пошкоджена зона росту при морфологічному дослідженні ліктьового відростка

Fig. 5. The damaged growth area at morphological study of the olecranon process

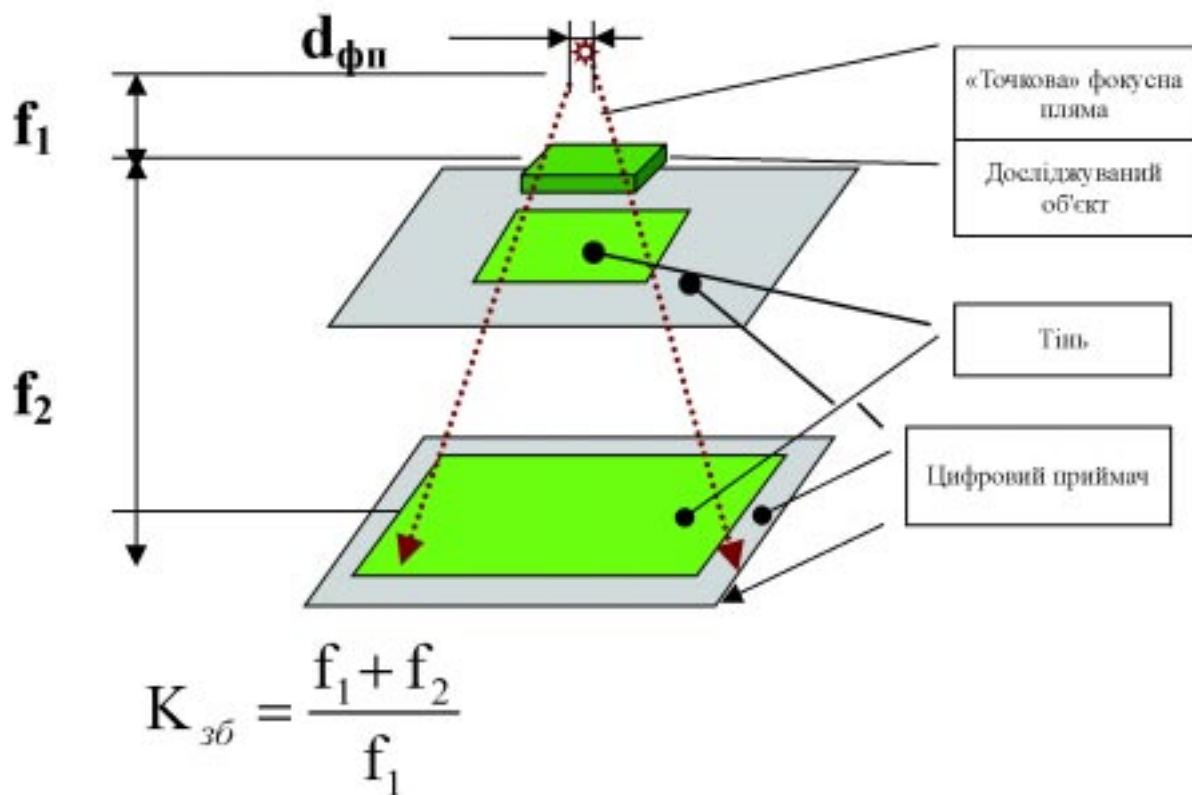


Рисунок 6. Схема мікрофокусного способу рентгенографії із прямим збільшенням зображення, де  $K_{зб}$  — коефіцієнт збільшення,  $f_1$  — відстань трубка-об'єкт,  $f_2$  — відстань об'єкт-поверхня цифрового приймача

Fig. 6. A scheme of microfocus radiography with direct image magnification, where  $K_{зб}$  — magnification coefficient,  $f_1$  — tube-object distance,  $f_2$  — distance object-surface of digital receiver

де  $f$  — розмір фокусної плями рентгенівської трубки, мм;

$R_n$  — роздільна здатність приймача рентгенівського зображення, пар лін./мм.

Критерій  $fR_n$  — добуток розміру фокусної плями на роздільну здатність приймача зображення. Якщо  $fR_n > 2$ , то апарат може бути використаний для контактної зйомки, якщо  $fR_n < 0,3$  — для рентгенівської мікроскопії. Проміжну ділянку займають апарати для мікрофокусної рентгенографії, для яких  $fR_n = 0,3 - 2$  [9], до яких належить і апарат, використаний в нашому дослідженні.

З урахуванням збільшення зображення роздільну здатність можна розрахувати з наступної формули:

$$R_{\Sigma} = \sqrt{R_n + \left(\frac{1}{f}\right)^2} = R_n \sqrt{m_{\text{оnm}}} , \quad (2)$$

де  $R_n$  — роздільна здатність приймача рентгенівського зображення, пар лін./мм,

$m_{\text{оnm}}$  — коефіцієнт збільшення зображення,

$f$  — розмір фокусної плями рентгенівської трубки, мм.

Зі співвідношення (2) випливає, що максимальна роздільна здатність апарата буде забезпечена коефіцієнтом збільшення зображення.

При проведенні мікрофокусної рентгенографії було використано приймач роздільною здатністю 4 п.л./мм. Таким чином, виходячи з формули (1),  $m_{\text{оnm}}$  дорівнює 7,25 разу, а реальна роздільна здатність приймача — 10,8 п.л./мм.

На підставі формули (1), де  $m_{\text{оnm}} = 7,25$  разу, при відстані від джерела випромінювання до площини приймача 100 см відстань об'єкта від джерела випромінювання дорівнює 13 см (пояснення до рисунка б).

Діапазон значень коефіцієнта збільшення зображення, при якому роздільна здатність конкретного методу рентгенографії не опускається нижче роздільної здатності приймача зображення, називається глибиною різкості рентгенівського апарата. Розрахунки показують, що глибина різкості мікрофокусного апарата не обмежується коефіцієнтом збільшення зображення, тоді як для звичайного апарата вона обмежена значенням  $m = 1,12$ , понад якого роздільна здатність контактного способу рентгенографії буде гірше роздільної здатності використовуваного приймача зображення.

Таким чином, в мікрофокусних апаратах роздільна здатність приймача «реалізується» повністю по всьому об'єму просвічування об'єкта. Цим пояснюється експериментально встановлений факт — на мікрофокусних рентгенівських знімках спостерігається більше дрібних деталей будови об'єкта просвічування, ніж на контактних знімках апаратів з великими фокусними плямами, тобто зростає кількість виявлених деталей в одиниці об'єму досліджуваних органів [10].

Ще однією важливою властивістю мікрофокусної рентгенографії є фазова контрастність. Як відомо, при перпендикулярному падінні хвилі на поверхню об'єкта її заломлення не відбувається. Зі зменшенням кута падіння кут відхилення зростає і досягає максимального значення при куті заломлення, що дорівнює нулю. Відповідний цьому значенню кута заломлення кут падіння є найменшим кутом, при якому рентгенівське випромінювання може входити в об'єкт через поверхню розділу середовищ. Очевидно, що кванти випромінювання, що падають на поверхню об'єкта під великими кутами, не відіграють жодної значної ролі в описуваному механізмі утворення зображення і взаємодіють з речовиною шляхом поглинання або розсіювання. І тільки «ковзаючі» по межі розділу середовищ кванти реально беруть участь в підвищенні контрасту, не поглинаючись при цьому речовиною об'єкта. На мікрофокусних рентгенограмах свідченням виникнення фазового контрасту є наявність темної і світлої оконтурювальних ліній безпосередньо навколо зображення об'єкта або на межі середовищ з різною щільністю [10], що і дозволило, на нашу думку, візуалізувати пошкодження хрящової частини зони росту.

## Висновки

Застосування цифрової мікрофокусної рентгенографії з прямим збільшенням зображення дозволяє підвищити ефективність діагностики переломів кісток ліктьового суглоба з пошкодженням зон росту, об'єктивізувати такі види пошкоджень, як епіфізеоліз, апофізеоліз без зміщення ядра скостеніння, а також при відсутності ядер скостеніння, проводити адекватну тактику лікування, тим самим поліпшуючи прогноз і знижуючи відсоток ускладнень таких пошкоджень.

---

## Література

1. Perron A.D., Miller M.D., Brady W.J. // *Am. J. Emerg. Med.* – 2002. – Vol. 20, № 1. – P. 50–54.
2. Wattenbarger J.M., Gruber H.E., Phieffer L.S. // *J. Pediatr. Orthop.* – 2002. – Vol. 22, № 6. – P. 703–709.
3. Меркулов В.Н., Дорохин А.И., Стужина В.Т., Соколов О.Г. // *Вест. травматол. и ортопед. им. Н.Н. Приорова.* – 2006. – № 3. – С. 52–57.
4. Hart E.S., Turner A., Albright M., Grottkau B.E. // *Orthop. Nurse.* – 2011. – Vol. 30, № 1. – P. 11–17.
5. Hamlet A. Peterson Epiphyseal growth plate fractures. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. – 914 p.
6. Degenhardt P., Kleber C., Bail H.J. // *Anesthesiol. Intensivmed. Notfallmed. Schmerzther.* – 2009. – Vol. 44, № 6. – P. 445–449.
7. Kan J.H., Estrada C., Hasan U. et al. // *Pediatr. Emerg. Care.* – 2009. – № 25. – P. 226–230.
8. Jaramillo D., Kammen B.F., Shapiro F. // *Radiol.* – 2000. – Vol 215 (2). – P. 504–511.
9. Патент на корисну модель № 70809 «Спосіб діагностики пошкоджень фізарних зон в експерименті» / Миронова Ю.А., Шармазанова О.П., Коваленко Ю.М., Балашов С.В. – № заявки и 2011 14625, заявлено 09.12.2011; опубл. 25.06.2012, Бюл. № 12.
10. Микрофокусная рентгенография. Практикум для диагноста / Н.Н. Потрахов, Г.Е. Труфанов, А.Ю. Васильев, Д.Ю. Анохин и др. // СПб: ЭЛБИ, 2012. – 79 с.

Надходження до редакції 05.02.2013.

Прийнято 04.04.2013.

Адреса для листування:  
Шармазанова Олена Петрівна,  
Харківська медична академія післядипломної освіти,  
вул. Корчагінців, 58, Харків, 61176, Україна