

УДК 615.47+616-71

СЕРГІЙ ФІЛІМОНОВ, ЮРІЙ ФЕДУРЦЯ, МАРИНА КРИВОБОК, ЛІЛІЯ АВЕР'ЯНОВА

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО КІЛЬКІСНОЇ ОЦІНКИ ЩІЛЬНОСТІ ТРАБЕКУЛЯРНОЇ ТКАНИНИ ХРЕБЦІВ У КЛІНІЧНІЙ ПРАКТИЦІ

*Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна,
serhii.filimonov@nure.ua, yurii.fedurtsia@nure.ua, lilya.averyanova@nure.ua*

Анотація. У статті представлено аналіз підходів до застосування наявних клінічних систем конвенційної рентгенівської комп'ютерної томографії (КТ) для поглибленого аналізу кісткового статусу пацієнтів на предмет наявності системних остеопоротичних змін у хребті. Наведено результати досліджень наявних технологічних трендів остеологічної діагностики, які дозволяють розширити діагностичні можливості КТ-систем у напрямку контролю втрати кісткової маси. Одним з рішень цієї задачі є створення спеціалізованих програмних засобів обчислення морфометричних параметрів трабекулярних структур тіл хребців, які базуються на фундаментальних дослідженнях у галузях гістології та мікро-КТ.

Ключові слова: остеопороз, перелом хребця, мінеральна щільність кісткової тканини, морфометричні параметри трабекулярної тканини, мікро-КТ.

Abstract. The article presents an analysis of approaches to the use of existing clinical systems of conventional X-ray computed tomography (CT) for in-depth analysis of the bone status of patients for the presence of systemic osteoporotic changes in the spine. The results of research on existing technological trends in osteological diagnostics are presented, which allow expanding the diagnostic capabilities of CT systems in the direction of monitoring bone loss. One of the solutions to this problem is the creation of specialized software tools for calculating morphometric parameters of trabecular structures of vertebral bodies, which are based on fundamental research in the fields of histology and micro-CT.

Keywords: osteoporosis, vertebral fracture, bone mineral density, trabecular tissue morphometry parameters, Micro CT.

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-50-2-277-281

1. ВСТУП

Кісткові структури мають композитну природу: мінеральний компонент відіграє важливу роль у забезпеченні механічної міцності кістки, тоді як органічна матриця забезпечує її пружність та пластичну деформацію. Мінеральна щільність кісткової тканини (МЩКТ) є мірою кількості неорганічної мінеральної складової (переважно кальцію та фосфору) у певному об'ємі кістки. Порушення міцності кісткових структур спричиняє патологічні переломи, поширеність яких у світі набула масштабів «тихої» епідемії.

Вимірювання МЩКТ найчастіше використовуються для діагностики остеопорозу. Остеопороз (ОП) є системною патологією, яка характеризується значним зниженням МЩКТ та втратою кісткової маси. Щорічно у світі у людей віком понад 55 років трапляється до 37 млн переломів, спричинених ламкістю кісток, що еквівалентно 70 переломам на хвилину [1].

Переломи хребців є найпоширенішими ОП-переломами, які спричиняють біль в спині, втрату зросту, деформації, нерухомість та навіть зниження функції легень [2]. Частота переломів хребців зростає з віком в обох статей. Втрата кісткової маси в хребцях на 10% може подвоїти ризик переломів хребців. [3]

В разі виявлення перелому хребця вчасне лікування дає можливість попередити повторні переломи. ОП хребта зазвичай визначається за радіологічними критеріями, проте третина переломів хребців залишаються нерозпізнаними під час локальної оцінки латеральної рентгенограми грудного поперекового відділу хребта. І навіть за наявності серйозних клінічних симптомів ОП менше 10% переломів хребців призводять до госпіталізації.

Отже недостатня діагностика переломів хребців є проблемою в усьому світі. Насамперед вона зумовлена недостатністю методологічного та технічного забезпечення рутинного діагностичного процесу.

2. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

Кількісна оцінка стану трабекулярної кісткової тканини на основі візуального аналізу зображення її структури дозволяє отримати такі параметри, як об'ємна мінеральна щільність кісткової тканини (vBMD) та об'ємна частка трабекулярної кістки (об'єм кістки/загальний об'єм BV/TV), товщина трабекули (Tb.Th), кількість трабекул (Tb.N) та проміжки між ними (Tb.Sp), індекс взаємозв'язку (ICI) тощо (рис.1) [5, 6, 10-15]. Ці показники можуть бути отримані в процесі сегментації кісткових структур на діагностичних зображеннях та рекомендуються як частина мінімального набору діагностичних параметрів [6]. Проте точність визначення цих кількісних параметрів значно залежить від умов отримання відповідних зображень (технічні параметри сканування, алгоритми програмної обробки даних тощо).

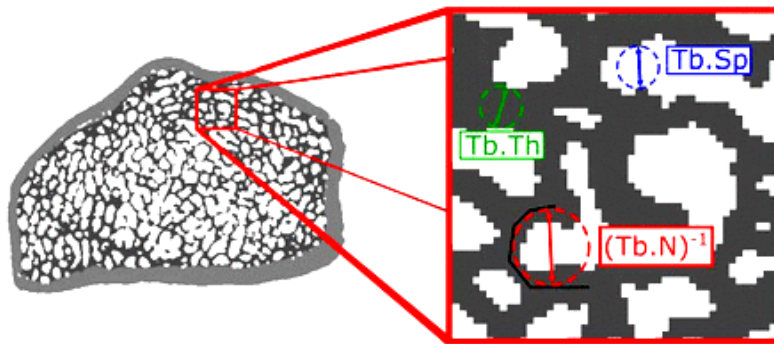


Рисунок 1 – Морфометричні параметри трабекулярних кісткових структур та їх геометричний зв'язок [6]

Огляд численних досліджень у галузі скринінгу та діагностики системних ОП-змін у кісткових структурах показав, що, не зважаючи на просування у розвитку альтернативних методів дослідження кісток (ультразвукова денситометрія, радіочастотна ехографічна мультиспектрометрія тощо), беззаперечними лідерами у царині діагностики ОП залишаються рентгенологічні методи з безпосередньою структурною візуалізацією кісток. Для якісної оцінки кісткового статусу застосовують класичну рентгенографію, для оцінки МЩКТ – двоенергетичну рентгенівську абсорбціометрію (DEXA), додатковим методом є рентгенівська комп'ютерна томографія (КТ) [4-10].

Основним трендом у діагностиці ОП нині стає адаптація рутинних КТ-сканів до видобування кількісних показників стану кісткової тканини [5, 6]. Проте оцінка точності відображення гістоморфологічних ознак кісткових структур та визначення їх параметрів потребує ретельного аналізу впливу технічних чинників КТсканування та алгоритмів реконструкції, які суттєво змінюються разом новими поколіннями КТ-систем.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Морфологічний аналіз кісткових трабекулярних структур за їх зображеннями можливий в разі, якщо метод зображення забезпечує просторове розрізнення об'єктів з детальністю, кращою за їх розміри. Фізично кісткові трабекули в нормі мають товщину $0,1 \div 0,18$ мм. Відомо що для унаочнення таких мікроструктур застосовуються гістологічний аналіз тонких кісткових препаратів [11] та рентгенівська мікро-КТ тіла хребця [12, 13]. (рис. 2 а, б). Гістоморфологічний та гістоморфометричний аналіз можна проводити за допомогою світлового мікроскопа *in vitro*, на зразках кісткового біоптату живої людини, тоді як мікро-КТ потребує роботи з посмертними зразками самих кісток і є суто дослідницькою технологією. Мікро-КТ забезпечує візуалізацію тіла хребця з просторовим розрізненням $5 \div 30$ мкм, що є достатнім для зображення кісткових трабекул в перерізі (рис. 2б), а, отже, розрахунку показників кісткового статусу на мікрорівні.

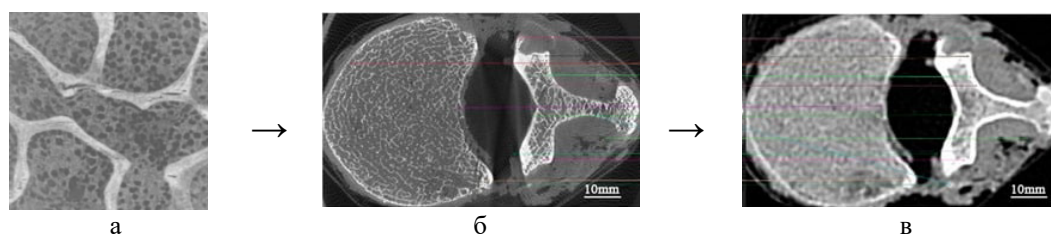


Рисунок 2 – Трабекулярна кісткова тканина на зображеннях:
а – гістологічний зріз трабекулярної кістки [11]; б – мікро-КТ зріз препарату хребця людини;
в – КТ зріз того ж препарату хребця [12]

Можливість визначення мікроструктурних параметрів стану кісткової тканини за рутинними *in vivo* рентгеновськими зображеннями значно обмежується через недостатнє просторове розрізнення. Так, просторове розрізнення зображення DEXA складає лише $0,3 \div 1$ мм, за принципом утворення воно є проєкційним, сумарним, як усі звичайні площинні рентгеновські знімки. Сканування відбувається лінійно, вздовж хребта, у вузько визначеній ділянці (рис. 3 а). Через накладення тіней усіх структур у напрямку зйомки немає жодної можливості сегментувати трабекули кісткової тканини всередині тіла хребця (рис. 3 б). Отже, оцінка МЩКТ проводиться за досить узагальненими показниками ослаблення рентгеновського випромінювання тканинами хребця. Технологія DEXA потребує окремого рентгеновського апарату, який здатен реалізовувати лише вузькоспеціалізовані дослідження кісток. Дослідження DEXA вдвічі дорожче за звичайну рентгенографію хребта. Тому денситометрія DEXA не має широкого клінічного застосування.

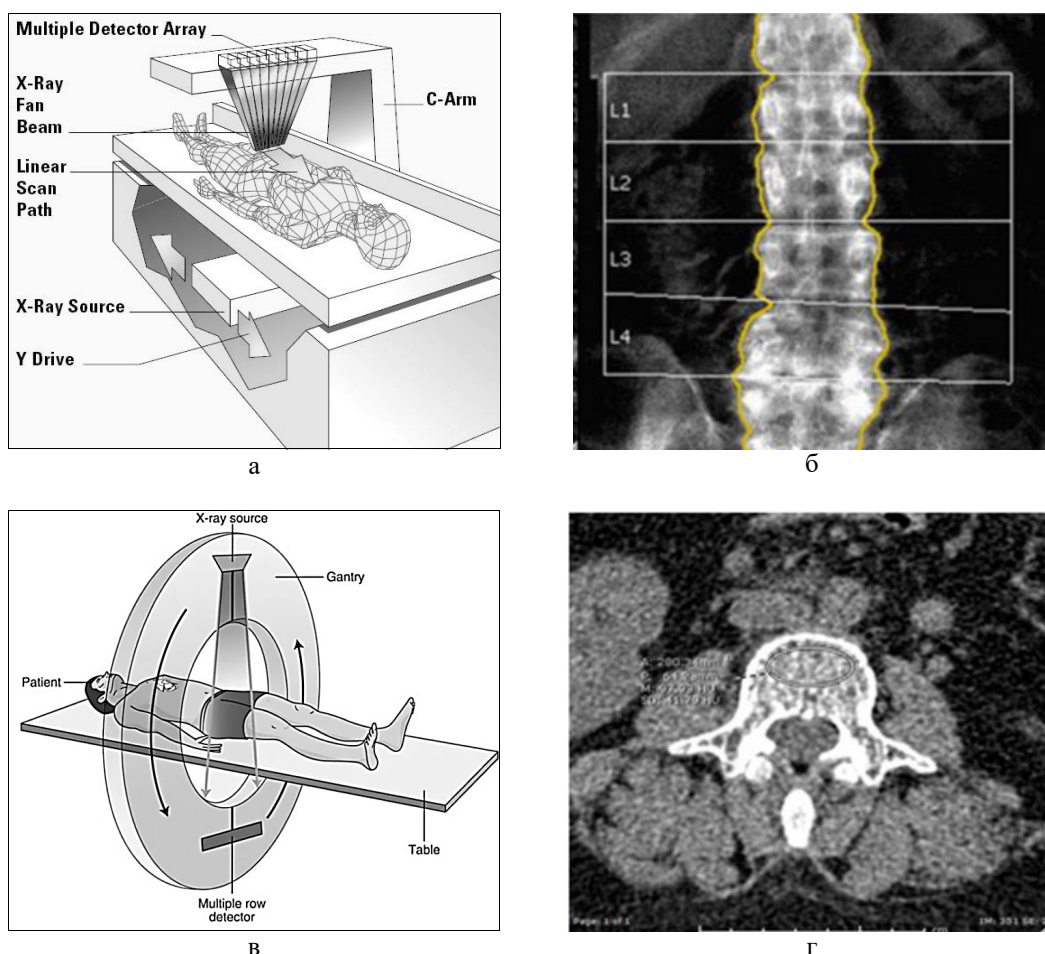


Рисунок 3 – Порівняння технологій отримання зображень DEXA та КТ:
а, б – DEXA-сканування [8] та зображення хребців L1-L4 [5];
в, г – КТ-сканування [9] та КТ-зріз поперекового хребця [5]

Нині проводиться чимало досліджень щодо можливості отримання спеціалізованих розрахунків параметрів кісткових тканин за результатами рутинного КТ-сканування торакальної та абдомінальної зон тіла, виконаного з приводу діагностики інших патологій [6, 7]. Використання результатів таких більш масових клінічних досліджень значно розширює можливості оцінки кісткового статусу за вже наявними зображеннями. При цьому традиційним підходом до верифікації діагностичних діапазонів кількісних КТ-показників кісткового статусу є встановлення відповідності загальновідомим параметрам, отриманим за допомогою «золотого стандарту» діагностики DEXA. Однак, за технологією отримання зображень, DEXA та КТ є абсолютно різними методиками рентгенівської візуалізації. Принципова відмінність КТ полягає у відсутності ефекту накладення рентгенівських тіней через зображення структур у перерізі, що потенційно може покращити окреме виявлення трабекулярної тканини за діапазоном чисел Хаунсфілда (рис. 3 в, г). Проте слід не забувати, що КТ-зображення є результатом обчислювальної математичної реконструкції. Це накладає обмеження на розмір матриці реконструкції просторове розрізнення (до $0,5 \div 1$ мм). Таке низьке розрізнення також не дозволяє візуалізувати кісткові трабекули, хоча з'являється можливість окремо дослідити ту область тіла хребця, де наявна трабекулярна кісткова тканина.

Очевидно, що при визначенні показників кісткового статусу за аналізом КТ-зрізів необхідно спиратись на інші споріднені зображення, які дають уявлення про кісткову тканину саме у її тонкому перерізі, а не як про наскрізну адитивну структуру. Тому найбільш правильним способом кількісної оцінки кісткового статусу є створення масиву КТ-даних у нормі, що підтверджується відповідними гістологічними і, бажано, мікро-КТ-даними. Тоді процес визначення діагностичних інтервалів КТ-показників кісткового статусу в нормі та різних варіантах патології має передбачати поетапне встановлення відповідності між референсними гістологічними та мікро-КТ параметрами кісткових тканин з наступним знаходженням кореляції між даними мікро-КТ та клінічної КТ [14].

Одним з перспективних підходів до вирішення цієї задачі є спроба генерації зображення, подібного до мікро-КТ хребців, на основі даних мультиспіральної КТ (МСКТ) із застосуванням технології Deep Learning [15]. Основною метою дослідження було опрацювання алгоритмів покращення чіткості КТ-зображення хребця на базі порівняння з його ж мікро-КТ. Покращення візуалізації трабекул має бути забезпечене за рахунок зниження рівня шуму, поліпшення різкості та текстури [16-18]. Даний спосіб постобробки рутинних КТ-зображень не призвів до суттєвих відмінностей у визначенні об'ємної частки кісткової тканини (BV/TV) ($p > 0,05$) та виявив значні кореляції у товщині трабекул (Tb.Th) та трабекулярній відстані (Tb.Sp) (Tb.Th, $R = 0,90$, $p < 0,05$; Tb.Sp, $R = 0,88$, $p < 0,05$). Запропонований метод може підвищити роздільну здатність МСКТ та отримати зображення кісткових структур, подібні до мікро-КТ, що може забезпечити нові діагностичні критерії та прогностичну основу для діагностики остеопорузу та пов'язаних з ним переломів [15].

ВИСНОВКИ

Проведено порівняльний аналіз методологічних та технічних реалізацій клінічних технологій оцінки стану трабекулярної тканини хребців та її структурних змін в контексті розвитку остеопоротичного процесу. Розглянуто можливості цільового аналізу наявних КТ-досліджень на предмет виявлення додаткових діагностичних показників контролю кісткового статусу.

Розробка та інтеграція спеціалізованих програмних засобів для покращеного структурного аналізу трабекулярної тканини на основі наявних КТ-зображень має значно розширити коло осіб, щодо яких діагностика ОП змін не потребувала б додаткових досліджень, специфічного обладнання та зайвого променевого навантаження.

Подальші комплексні дослідження у галузі гістології та КТ забезпечать можливість об'єктивізувати процес визначення діагностичних інтервалів КТ-показників кісткового статусу в нормі та різних варіантах патології.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Global Burden Disease Fracture Collaborators. Global, regional, and national burden of bone fractures in 204 countries and territories, 1990-2019: a systematic analysis from the global burden of disease study 2019. *Lancet Healthy Longev.* 2021;2(9):e580–e592. doi: [https://doi.org/10.1016/S2666-7568\(21\)00172-0](https://doi.org/10.1016/S2666-7568(21)00172-0).
2. Tei, R.M.H., Ramlau-Hansen, C.H., Plana-Ripoll, O. *et al.* OFELIA: Prevalence of Osteoporosis in Fragility Fracture Patients. *Calcif Tissue Int* **104**, 102–114 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00223-018-0476-3>
3. International Osteoporosis Foundation. Vertebral fractures. <https://www.osteoporosis.foundation/health-professionals/fragility-fractures/epidemiology>

4. National Osteoporosis Guideline Group. Fracture Risk Assessment And Case Finding. <https://www.nogg.org.uk/full-guideline/section-3-fracture-risk-assessment-and-case-finding>
5. M. M. Abuzaid, W. Elshami, F. A. G. AKL, H. Al Hashami ; Sharjah/AE. Opportunistic screening for osteoporosis using computed tomography among menopausal women in comparison with dual energy X-ray absorptiometry measurements. ECR 2020, Poster C-00759. doi: <https://doi.org/10.26044/ecr2020/C-00759>
6. Nathan J. Neeteson, Annabel R. Bugbird, Lauren A. Burt, Steven K. Boyd. Statistical investigation of interdependence of trabecular microarchitectural parameters from micro-computed tomography. Bone, Volume 187, 2024, 117144, ISSN 8756-3282, <https://doi.org/10.1016/j.bone.2024.117144>
7. Jang S, Graffy PM, Ziemlewicz TJ, Lee SJ, Summers RM, Pickhardt PJ. Opportunistic Osteoporosis Screening at Routine Abdominal and Thoracic CT: Normative L1 Trabecular Attenuation Values in More than 20 000 Adults. Radiology. 2019 May;291(2):360-367. doi: <https://doi.org/10.1148/radiol.2019181648>. Epub 2019 Mar 26. PMID: 30912719; PMCID: PMC6492986
8. The Pitfalls of Body Fat “Measurement”, Part 6: Dual-Energy X-Ray Absorptiometry (DEXA) <https://weightology.net/the-pitfalls-of-body-fat-measurement-part-6-dexa/>
9. How CT Scans Work and Why They Matter. Kiran Nuclear Medicine & PET/CT Centre. <https://kiranpetct.com/how-ct-scans-work-and-why-they-matter/>
10. S. Filimonov, A. Liliia and M. Tymkovych, "Analysis of CT Parameters of Trabecular Tissue Density of Vertebral Body," 2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 2024, pp. 1-4, doi: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61434.2024.10878080>.
11. Kulak CA, Dempster DW. Bone histomorphometry: a concise review for endocrinologists and clinicians. Arq Bras Endocrinol Metabol. 2010 Mar;54(2):87-98. doi: 10.1590/s0004-27302010000200002.
12. Forensic analysis using micro-CT. <https://le.ac.uk/richardiii/identification/forensic-analysis>
13. Molino, Giulia, Giorgia Montalbano, Carlotta Pontremoli, Sonia Fiorilli, and Chiara Vitale-Brovarone. 2020. "Imaging Techniques for the Assessment of the Bone Osteoporosis-Induced Variations with Particular Focus on Micro-CT Potential" *Applied Sciences* 10, no. 24: 8939. <https://doi.org/10.3390/app10248939>
14. Klintström, E., Smedby, Ö., Moreno, R. *et al.* Trabecular bone structure parameters from 3D image processing of clinical multi-slice and cone-beam computed tomography data. *Skeletal Radiol* 43, 197–204 (2014). <https://doi.org/10.1007/s00256-013-1766-5>
15. Jin, D.; Zheng, H.; Zhao, Q.; Wang, C.; Zhang, M.; Yuan, H. Generation of Vertebra Micro-CT-like Image from MDCT: A Deep-Learning-Based Image Enhancement Approach. *Tomography* 2021, 7, 767–782. <https://doi.org/10.3390/tomography7040064>
16. Інтелектуальні технології в медичній діагностиці, лікуванні та реабілітації: монографія / Павлов С. В., Аврунін О. Г., Злепко С. М. та ін. – Вінниця: ПП «ТД «Едельвейс і К», 2019. – 260 с.
17. Ю. Самохін і О. Аврунін, «Автоматизація повного циклу обробки кріомікроскопічних зображень: від збору до аналітики», *Опт-ел. інф-енерг. техн.*, вип. 49, вип. 1, с. 20–28, 2025.
18. Abramova, H., & Avrunin, O. (2020). Development of a method for analyzing tomographic images of bone structures. *innovative technologies and scientific solutions for industries*, (3 (13), 115–121. <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2020.13.115>

Надійшла до редакції 10.09.2025р.

ФІЛІМОНОВ, СЕРГІЙ - аспірант, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна, [e-mail: serhii.filimonov@nure.ua](mailto:serhii.filimonov@nure.ua)
ФЕДУРЦЯ, ЮРІЙ - аспірант, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна, [e-mail: yurii.fedurtsia@nure.ua](mailto:yurii.fedurtsia@nure.ua)
КРИВОБОК, МАРИНА - студент, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна, [e-mail: maryna.kryvobok@nure.ua](mailto:maryna.kryvobok@nure.ua)
АВЕР'ЯНОВА ЛІЛІЯ - PhD, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна, [e-mail: lilya.averyanova@nure.ua](mailto:lilya.averyanova@nure.ua)

SERHII FILIMONOV, YURII FEDURTSIA, MARYNA KRYVOBOK, LILIIA AVERIANOVA
MODERN APPROACHES TO QUANTITATIVE ASSESSMENT OF TRABECULAR TISSUE
DENSITY OF VERTEBRAL IN CLINICAL PRACTICE
Kharkiv National University of Radio Electronics