

В.М. Коваленко¹
А.М. Гнилорибов²
Ю.В. Білявська¹
О.В. Богатирьова³

¹ДУ «Національний науковий центр «Інститут кардіології, клінічної та регенеративної медицини імені академіка М.Д. Стражеска» НАМН України

²Національний інститут серцево-судинної хірургії імені М.М. Амосова НАМН України

³Донецький національний медичний університет, м. Кропивницький

Ключові слова: подагра, кристали моноурату натрію, тофуси, двохенергетична комп'ютерна томографія, чутливість та специфічність.

ДВОХЕНЕРГЕТИЧНА КОМП'ЮТЕРНА ТОМОГРАФІЯ: НОВИЙ СТАНДАРТ У ДІАГНОСТИЦІ ПОДАГРИ

Стаття присвячена новому методу діагностики подагри — двохенергетичній комп'ютерній томографії (ДЕКТ). Цей інноваційний метод дозволяє значно підвищити точність виявлення уратних кристалів, що є ключовим фактором у діагностиці подагри. ДЕКТ використовує два різні енергетичні рівні для отримання зображень, що дає змогу чітко розрізняти урати від інших тканин і відкладень, зокрема від кристалів кальцію. **Методи дослідження.** У статті проаналізовано місце і роль ДЕКТ у сучасних рекомендаціях щодо діагностики і моніторингу пацієнтів з подагрою. Використання ДЕКТ дозволяє уникнути інвазивних процедур, таких як суглобова пункція, і забезпечує більш швидкий та точний діагностичний висновок. Описано принципи, на яких ґрунтується візуалізація кристалів сечової кислоти, що сприяє покращенню діагностики у випадках незрозумілих клінічних проявів подагри. У статті наведені результати клінічних досліджень, що підтверджують ефективність і надійність ДЕКТ у діагностиці подагри, а також економічні аспекти та обмеження методу. **Результати.** ДЕКТ демонструє високу чутливість і специфічність, що робить його пріоритетним вибором у складних діагностичних випадках. Аналізуються також економічні аспекти використання ДЕКТ, включаючи витрати на обладнання та процедури. На завершення, автори наголошують, що впровадження ДЕКТ у клінічну практику може значно знизити доцільність інвазивних процедур, підвищуючи ефективність і точність діагностики, а також, можливо, покращити прогнозування перебігу захворювання.

Останніми роками все більше використовуються різноманітні передові методи візуалізації, включаючи ультразвукове дослідження з доплером (УЗД), магнітно-резонансну томографію (МРТ) і звичайну комп'ютерну томографію (КТ). Кожен з цих методів має свої унікальні переваги та недоліки. Однак жоден з них не є достатньо точним, щоб підтвердити діагноз подагри. Двохенергетична КТ (dual-energy computed tomography, ДЕКТ) — нове дослідження, яке дозволяє ідентифікувати відкладення кристалів моноурату натрію та все частіше використовується в діагностиці як тофусної подагри, так і подагри без наявних тофусів.

Перше практичне використання ДЕКТ для виявлення відкладень кристалів моноурату натрію при подагрі описано в 2007 р. [1]. Цей початковий звіт продемонстрував здатність ДЕКТ створювати кольорові зображення кристалів моноурату та на основі хімічного складу відрізняти їх від інших структур. У 2009 р. опубліковано більш детальну серію випадків у 20 пацієнтів із тофусною подагрою, яка підтвердила здатність ДЕКТ виявляти субклінічні відкладення, невидимі під час фізичного огляду [2].

Мета статті — проаналізувати доцільність, ефективність та специфічність ДЕКТ в сучасній діагностиці подагри, роль цього методу в моніторингу та про-

гнозуванні перебігу хвороби, порівняти з іншими інструментальними методами (МРТ, КТ, УЗД), та головне — відобразити місце ДЕКТ в сучасних міжнародних рекомендаціях з візуалізації та діагностики подагри (Європейського альянсу асоціацій ревматологів (European Alliance of Associations for Rheumatology — EULAR), Американського коледжу ревматологів (American College of Rheumatology — ACR)).

І. Місце ДЕКТ в діючих рекомендаціях щодо діагностики подагри.

В оновлених рекомендаціях 2018 р. щодо діагностики подагри EULAR рекомендував трьохетапний підхід для діагностики подагри [3]. Перший крок (*крок 1-й) передбачає ідентифікацію кристалів моноурату натрію у синовіальній рідині або аспіратах тофусу. Якщо це неможливо, другий крок залежить від клінічного діагнозу (на основі наявності гіперурикемії та відповідних клінічних ознак подагри) (**крок 2-й). Останній крок (***) крок 3-й) рекомендує візуалізацію, зокрема УЗД або ДЕКТ, для пошуку доказів відкладення кристалів моноурату, коли клінічний діагноз подагри невизначений і ідентифікація кристалів неможлива (таблиця).

У переліку з 8 рекомендацій EULAR щодо діагностики подагри 2 стосуються місця візуалізації в її діагностиці. Так, в 1-й та 3-й рекомендаціях кожно-

Рекомендовані методи діагностики залежно від наявності гіперурикемії або подагри [3]

Діагностичні засоби	Асимптоматична гіперурикемія (немає кристалів моноурату)	Асимптоматичні депозити кристалів моноурату (депозити кристалів моноурату без симптомів подагри)	Подагра		
			Загострення подагри	Подагра поза нападами	Хронічний подагричний артрит
Крок 1-й. Пошук кристалів моноурату*	–	+	+	+	+
Крок 2-й. Клінічний діагноз**	–	–	+	+	+
Крок 3-й. Візуалізація***	–	–	+	+	+

му пацієнту з підозрою на подагру рекомендується виявляти кристали в синовіальній рідині або аспіратах тофусу, оскільки саме наявність кристалів моноурату натрію дозволяє встановити остаточний діагноз подагри (Рекомендація 1). Крім того, настійно рекомендується проводити аспірацію синовіальної рідини та її дослідження на наявність кристалів у будь-якого пацієнта з недіагнованим запальним артритом (Рекомендація 3).

У разі коли клінічний діагноз подагри є невизначеним і ідентифікація кристалів неможлива, пацієнтів слід обстежити за допомогою методів візуалізації для пошуку відкладення кристалів урату та ознак будь-якого альтернативного діагнозу (Рекомендації 5 та 6). Визначено, що останнім часом досягнуто значного прогресу у візуалізації подагри, особливо за рахунок імплементації УЗД, ДЕКТ, традиційної КТ та МРТ [4].

Експерти вважають, що загалом УЗД пропонує найкращий потенціал для діагностики подагри. (Хоча слід зазначити, що, з нашої точки зору, цей метод потребує досить високої кваліфікації оператора, наявності у нього значного досвіду та не завжди є широко доступним. Крім того, чутливість та специфічність УЗД при аналізі в дослідженні OMERACT, що вказували на відкладення кристалів уратів («подвійний контур» і тофуси), становили 75 і 89% відповідно. Розглядаючи окремо дані УЗД, чутливість і специфічність становили 42 і 92% для ознаки «подвійного контуру» і 40 і 100% — для тофусів відповідно) [5].

ДЕКТ є багатообіцяючим дослідженням і має перевагу в диференціюванні відкладень кристалів уратів від сполучної тканини та інших кальційвмісних мінеральних структур через їх специфічні властивості та здатність до ослаблення рентгенівського випромінювання [6–8].

ДЕКТ також може кількісно визначити навантаження кристалів моноурату у суглобах та навколо них, а також досліджувати «глибоко розташовані» анатомічні структури/ділянки (наприклад хребет). Чутливість методу, за даними різних досліджень, коливається від 0,71 до 0,97, специфічність — від 0,84 до 0,95 відповідно [9–12].

Звичайні рентгенограми призначені для пошуку доказів відкладення кристалів моноурату, але мають обмежену цінність для діагностики загострення подагри (рекомендація 6). У той же час УЗД є більш корисним саме у пацієнтів із підозрою на загострення подагри чи із хронічним подагричним артритом шляхом виявлення субклінічних тофусів (таких, що не виявляються під час клінічного обстеження) або ознаки «подвійного контуру» на поверхні хряща — дуже специфічної риси для відкладень

уратів у суглобах. У пацієнтів із тривалістю захворювання 4 роки чутливість і специфічність рентгенографії щодо ідентифікації ерозій становить 0,12 і 0,96 відповідно [13]. Таким чином, низька чутливість рентгенографії робить її недостатньо надійним методом діагностики.

УЗД становить великий інтерес для діагностики подагри через його низьку вартість, широку доступність і відсутність радіаційного опромінення. Діагностична ефективність була оцінена в кількох дослідженнях. У цілому чутливість УЗД є нижчою на ранніх стадіях захворювання, аніж на пізніх. Так, чутливість визначення тофусів коливається від 0,33 до 0,65, ознаки «подвійного контуру» — 0,50–0,83; поява «хуртовини» (snowstorm appearance) — 0,29–0,32. Специфічність УЗД була значно вищою — 0,80–0,95; 0,76–0,92; 0,90–0,92 відповідно [14–15].

ДЕКТ дає змогу неінвазивно виявляти та характеризувати відкладення кристалів моноурату натрію у суглобах і м'яких тканинах [16]. Ця методика може бути корисною, зокрема, у випадках, коли проведення УЗД є неможливим або технічно ускладненим (наприклад подагричне ураження хребта). Проте ДЕКТ не є широкодоступною і, крім того, потенційно більш дорогавартісною і передбачає певне радіаційне опромінення. Саме через це використання ДЕКТ часто обмежується центрами вторинного та третинного рівня надання медичної допомоги. Діагностична продуктивність ДЕКТ щодо ідентифікації кристалів моноурату натрію як еталонного тесту є зіставною із УЗД, і потенційно більш інформативною щодо виявлення осадження кристалів моноурату у разі прямого порівняння з УЗД [17–20].

Не менш важливим є той факт, що зчитування та інтерпретація зображень ДЕКТ потребують навичок і досвіду, зважаючи на потенційні ризики артефактів, які можуть призвести до хибної позитивності результатів [21–22].

Важливо підкреслити, що як УЗД [23–24], так і ДЕКТ [25] можуть бути інформативними для оцінки розчинення тофусу у відповідь на уратзнижувальну терапію.

II. Рекомендації EULAR/ACR щодо використання візуалізації в клінічній практиці мікрокристалічних артропатій.

Ці рекомендації опубліковано 6 лютого 2024 р. в провідному журналі EULAR — Annals of Rheumatic Diseases [26]. Ще раніше, теж на початку 2024 р., опубліковано ретельний систематичний огляд літератури, результати якого і стали основою для розробки вищезазначених рекомендацій, беручи до уваги наявні дані доказової медицини щодо використання

методів візуалізації у клінічній практиці при артропатіях, спричинених кристалами [27].

Що нового в цьому огляді?

Сформовано 14 груп дослідницьких запитань (RQ) (RQ1–RQ4 для подагри, RQ5–RQ8 для виявлення депозитів дигідрату пірофосфату кальцію, RQ9–RQ12 для виявлення відкладень основного фосфату кальцію, RQ13 щодо керівних процедур, RQ14 щодо навчання пацієнтів).

RQ1: діагностична цінність окремих методів візуалізації при подагрі. Проаналізовано 45 наукових робіт. Більшість досліджень оцінювали діагностичну здатність ДЕКТ (28 досліджень) та УЗД (23 дослідження). Серед досліджень, що оцінюють діагностичну здатність ДЕКТ для діагностики подагри, 21/28 (75%) та 21/28 (75%) повідомили про чутливість і специфічність $\geq 80\%$. Чутливість коливалася від 52,8 до 100,0%, специфічність — від 50,0 до 100,0% відповідно. 5 досліджень з 28 (17,9%) повідомили про ефективність ДЕКТ у діагностиці подагри в групах пацієнтів із різною тривалістю захворювання.

RQ2: можливість використання методів візуалізації для моніторингу запалення, пошкодження або відкладення кристалів при подагрі. Дослідження з використанням ДЕКТ для моніторингу відкладення кристалів при подагрі використовували або (напів-) кількісну оцінку, або загальний об'єм уратів натрію/тофусів. Усі дослідження (11/11, 100%) виявили значне зменшення об'єму після 6 міс до 3 років.

RQ3: здатність методів візуалізації передбачити тяжкість захворювання при подагрі. На жаль, жодного дослідження ролі ДЕКТ в цьому напрямку наразі не опубліковано. Проаналізовано 2 дослідження, в яких використовували звичайну КТ для прогнозування результату тяжкості захворювання при подагрі, в цілому з позитивними результатами.

RQ4: здатність методів візуалізації прогнозувати ефект лікування при подагрі.

В одному із досліджень проведено багатофакторний аналіз, включаючи вихідні УЗД, ДЕКТ, вихідний початковий сироватковий рівень уратів, супутні захворювання та інші клінічні параметри. Лише базовий об'єм моноурату натрію, оцінений ДЕКТ, був статистично значущим у моделі для прогнозування ефекту лікування при подагрі.

Які головні висновки зроблено авторами огляду стосовно ДЕКТ?

Умовно можна виділити 4 групи висновків:

1. Усі включені дослідження з ДЕКТ і всі дослідження з УЗД, за винятком одного, опубліковані після 2010 р., що відображає зростаючий інтерес до цього напрямку діагностики.

2. Більшість досліджень, що оцінюють діагностичну корисність ДЕКТ, повідомляють про хорошу чутливість і специфічність, підтверджує важливість і цінність цього методу. Нижчий рівень чутливості виявлено в 3/5 включених досліджень у пацієнтів із меншою тривалістю захворювання. Цей факт слід враховувати при інтерпретації результатів ДЕКТ у пацієнтів із підозрою на подагру та нещодавнім дебютом симптомів.

3. Усі дослідження, що оцінювали ДЕКТ або ознаку «подвійний контур» в УЗД, виявили значне змен-

шення відкладення кристалів у пацієнтів, які почали або отримували уратзнижувальну терапію.

4. Результати систематичного огляду літератури підкреслили зростаючий інтерес до використання методів візуалізації при мікрокристалічних артропатіях, зокрема УЗД і ДЕКТ.

На підставі цього огляду та обговорення експертних думок, в Рекомендаціях EULAR щодо візуалізації в діагностиці та лікуванні кристал-індукованих артропатій у клінічній практиці 2023 р. (опубліковано 6 лютого 2024 р.) сформульовано 5 головних принципів і 10 конкретних рекомендацій. Слід підкреслити, що це перші рекомендації з візуалізації мікрокристалічних артропатій. Нижче наведено найбільш важливі аспекти, пов'язані з тематикою цього огляду.

Загальне твердження В: візуалізація мікрокристалічних артропатій надає корисну інформацію про відкладення кристалів, запалення та структурні пошкодження.

Загальне твердження С: наявність аномалій візуалізації, зокрема тих, що пов'язані з відкладенням кристалів, не завжди може бути пов'язана з клінічними проявами. Невеликі тофуси при подагрі або кристалічні агрегати чи кристалічні відкладення в хрящі не обов'язково асоціюються із клінічними проявами і розглядаються як безсимптомне відкладення кристалів моноурату натрію.

Рекомендація 1: під час візуалізації мікрокристалічних артропатій слід враховувати як симптоматичні зони, так і специфічні для захворювання цільові ділянки (зокрема, перший плюснефаланговий суглоб при подагрі; колінний суглоб та зап'ясток при хворобі відкладення кристалів дигідрату пірофосфату кальцію; плечовий суглоб при хворобі депозитів основного кристалу фосфату кальцію).

Рекомендація 2: у діагностиці подагри **УЗД і ДЕКТ є рекомендованими методами візуалізації**. Переконливі докази діагностичної користі УЗД при подагрі продемонстровані для відкладення кристалів, зокрема ознаки «подвійного контуру» та тофусів, меншою мірою — для запалення чи ерозії кістки, тоді як докази ДЕКТ, природно, стосуються лише відкладення кристалів.

Рекомендація 3: якщо виявлено характерні ознаки відкладення кристалів уратів під час УЗД (наприклад «подвійний контур» або тофуси) або ДЕКТ, **аналіз синовіальної рідини не потрібен для підтвердження діагнозу подагри**. Однак, як правило, **пункцію суглоба слід робити завжди, коли це можливо, особливо для виключення інших причин гострого артриту, наприклад септичного артриту**, незалежно від того, чи є попередні докази подагри (наприклад позитивна ДЕКТ та гіперурикемія). Слід зазначити, що хоча УЗД може бути корисним для виявлення синовіту при загостреннях подагри, існують лише обмежені докази використання ДЕКТ для візуалізації запалення.

Рекомендація 6: при подагрі ультразвук і ДЕКТ можна використовувати для моніторингу відкладення кристалів, а УЗД також дозволяє оцінювати запальні зміни. Обидва методи надають додаткову інформацію, доповнюючи клінічну та біохімічну оцінку.

Рішення про те, коли повторювати візуалізацію, залежить від клінічних обставин. Ґрунтуючись на дуже обмежених наявних доказах, Робоча група вважає, що 1 рік є розумним періодом для моніторингу змін зображення при подагрі.

Рекомендація 8: при подагрі оцінка кількості кристалів моноурату за допомогою УЗД або ДЕКТ може бути використана для прогнозування майбутніх спалахів. Після початку уратзнижувальної терапії для прогнозування загострення подагри можна використовувати фіксацію зменшення відкладення кристалів або тофусів при УЗД чи ДЕКТ.

Рекомендація 10: демонстрація і пояснення результатів візуалізації мікрокристалічної артропатії пацієнтам з такими захворюваннями може допомогти їм зрозуміти свій стан і покращити прихильність до лікування подагри. Невелика кількість досліджень з використанням ДЕКТ показала переваги представлення особистих зображень або медичних ілюстрацій пацієнтам із подагрюю.

Нам здається це положення вкрай важливим, оскільки **вперше (!)** бачимо вказівку на те, що **використання методу діагностики рекомендоване для підвищення прихильності пацієнтів до лікування.**

III. Роль та частота депозитів уратів при безсимптомній гіперурикемії.

За наявності концентрацій сечової кислоти вище рівня насичення (≥ 410 ммоль/л; 6,8 мг/дл) за умови фізіологічної температури тіла та рівня рН, утворюються кристали урату натрію. Реакція організму на кристали уратів призводить до клінічних проявів подагри, таких як гострі спалахи та тофусна хвороба. Однак не у всіх пацієнтів із тяжкою гіперурикемією розвивається симптоматична подагра. Субклінічне відкладення уратів відбувається до дебюту симптоматичного захворювання. Місця відкладення можуть відігравати певну роль, зокрема, навколосуглобове відкладення може не призвести до клінічно вираженого захворювання. Кількість відкладень уратів також може впливати на розвиток симптоматичного захворювання. У цікавому дослідженні [28] порівнювали частоту, локалізацію та об'єм відкладень уратів при ДЕКТ у пацієнтів із безсимптомною гіперурикемією та симптоматичною подагрюю. Відкладення уратів на ДЕКТ виявили у 6/25 (24%) учасників із безсимптомною гіперурикемією, у 11/14 (79%) — з ранньою подагрюю (попередньо визначеною як тривалість захворювання ≤ 3 років) і 16/19 (84%) — з пізньою подагрюю ($p < 0,001$). Відкладення уратів на ДЕКТ виявлено як у суглобах, так і в сухожиллях у групі безсимптомної гіперурикемії, але значно рідше, ніж у пацієнтів з подагрюю ($p \leq 0,001$ як для суглобів, так і для сухожилів). Об'єм відкладення уратів також був значно нижчим у пацієнтів із безсимптомною гіперурикемією порівняно з групами ранньої та пізньої подагри ($p < 0,01$ для обох порівнянь). Подібні об'єми уратів відмічали в групах ранньої та пізньої подагри.

Незважаючи на те що рівні уратів у сироватці крові були значно вищими за визнані концентрації насичення, у більшості обстежених не отримано доказів відкладення уратів за даними ДЕКТ. Це може

відобразити низьку чутливість ДЕКТ для виявлення дуже низьких концентрацій кристалів моноурату натрію. Однак це свідчить про те, що фактори, відмінні від концентрації уратів в один момент часу, зумовлюють утворення кристалів уратів *in vivo*.

Хоча відкладення уратів можна виявити за допомогою ДЕКТ у стопах у деяких безсимптомних осіб із тяжкою гіперурикемією, ці відкладення виникають частіше та у більшому об'ємі в осіб із симптоматичною подагрюю. Ці дані, ймовірно, свідчать про те, що для появи симптоматичного захворювання необхідне перевищення порогу об'єму кристалів уратів.

IV. Локалізація депозитів уратів при подагрі та кореляція з УЗД та дослідженням синовіальної рідини за допомогою поляризаційної мікроскопії.

У дослідженні [29] порівнювали ДЕКТ та УЗД для діагностики подагричного артриту та зіставляли результати візуалізації з результатами аспірації синовіальної рідини. Зображення ДЕКТ виявили відкладення кристалів уратів у 25 із 37 суглобів. При цьому результати УЗД були позитивними в 24 із 37 досліджених суглобів. У 12 з 14 суглобів аспірація синовіальної рідини була позитивною. Результати ДЕКТ та УЗД корелювали у 32 із 37 суглобів (86,5%; $k=0,698$, $p < 0,001$). Результати ДЕКТ і синовіальної рідини корелювали у 12 із 14 суглобів (85,7%; $k=0,417$, $p=0,119$). Результати УЗД і дослідження синовіальної рідини корелювали в 14 з 14 суглобів (100%; $k=1$, $p < 0,001$). Автори дійшли висновку, що ДЕКТ та УЗД мають зіставну чутливість для виявлення подагричного артриту в клінічних умовах.

Відповідно до клінічних проявів загострень подагри, відкладення кристалів уратів та структурне захворювання суглобів найчастіше відмічають в 1-му і (рідше) в 3-му та 4-му метатарсофалангових суглобах [30]. Причина такої моделі ураження суглобів незрозуміла, але вона може бути пов'язана зі зниженим фізичним стресом або біомеханічним навантаженням під час циклу ходи в цих суглобах порівняно з іншими метатарсофаланговими суглобами [31]. Ще один додатковий висновок вищезазначеного дослідження полягав у тому, що певні особливості радіографічного пошкодження були менше асоційовані з осадженням кристалів моноуратів на ДЕКТ. Особливо це стосується звуження суглобової щілини та остеофітів. Можливо, це пов'язано з тим, що напади подагри часто виникають у суглобах, уражених остеоартритом [32].

V. Принципи роботи, переваги, технічні моменти та приклади візуалізації за допомогою ДЕКТ у пацієнтів з подагрюю.

Методика базується на одночасному отриманні зображень на двох різних рівнях енергії фотонів рентгенівського випромінювання (серії з високим і низьким кВ). Використовується фізичний принцип, згідно з яким ослаблення фотонів рентгенівського випромінювання залежить не лише від щільності, але й від ефективного атомного номера (Zeff) сканованого матеріалу. Ослаблення рентгенівських фотонів описується значеннями КТ і вимірюється в одиницях Хаунсфілда (HU).

Для ідентифікації кристалів уратів сканеру необхідно відрізнити відкладення моноурату від навко-

лишніх тканин, особливо кальційвмісного матеріалу (кістки/кальцифіковані м'які тканини) і м'яких тканин (сухожилля/хрящ/синовіальна тканина). Це розрізнення досягається за допомогою двох дискримінацій. По-перше, можна провести розрізнення між відкладеннями уратів і матеріалами, що містять кальцій, оскільки ці два матеріали мають різні лінійні коефіцієнти ослаблення. Лінійний коефіцієнт ослаблення ДЕКТ описує різницю в ослабленні в серіях з високим і низьким кВ, і ця різниця залежить від матеріалу, оскільки матеріали з високим Zeff (наприклад тканини, що містять кальцій) послаблюють низькоенергетичні рентгенівські фотони більше, ніж матеріали з низьким Zeff (наприклад відкладення уратів). По-друге, можна провести диференціацію між відкладеним моноуратом натрію та м'якими тканинами (які мають подібний Zeff), оскільки відкладення уратів зазвичай більш щільні, ніж м'які тканини, що призводить до вищого середнього значення КТ [33].

Кольорове кодування інформації про розміщення уратів у сканах ДЕКТ дозволяє за допомогою комп'ютерної автоматизованої процедури виміряти об'єм кожного клінічного або субклінічного тофусу, які потім підсумовуються, щоб отримати загальний об'єм відкладення уратів у місцях обстеження у цього пацієнта. Сканування ДЕКТ також має кілька переваг як інструмент подальшої візуалізації порівняно з МРТ, який раніше застосовували для кількісної оцінки розміру тофусу. Таким чином, зображення створюється шляхом чіткого відокремлення та кольорового кодування кальцію від урату натрію. Сканування ДЕКТ вважається позитивним через наявність кольорового кодування урату натрію в суглобах і навколосуглобових ділянках [34].

Ці переваги включають нижчу вартість (~1/6), короткий час сканування (~15 хв для всіх периферичних суглобів), одночасне сканування кількох частин, очевидне кольорове відображення кристалів і мінімальний вплив позиціонування.

У дослідженні [35] було вивчено поширені специфічні для уратів локалізації, які включали перший метатарсофаланговий суглоб і сухожилля надколінка, оскільки в цих місцях відмічали лише певні відкладення уратів. Усі пацієнти з подагрою з кольоровими ураженнями на ДЕКТ (21/21 пацієнт, 100%) мали ураження першого метатарсофалангового суглоба або сухожилля надколінка. Таким чином, для пацієнтів з подагрою ці локалізації мають високу діагностичну чутливість і специфічність.

Основним принципом використання ДЕКТ є диференціація матеріалів на основі їх відносного поглинання рентгенівського випромінювання на різних рівнях енергії фотонів (зазвичай при 80 і 140 кВ). В ідеалі матеріали, які необхідно диференціювати, повинні одночасно відобразитися на двох різних енергетичних рівнях. Диференційне ослаблення досліджуваного матеріалу було б прямо пов'язане з його атомною масою та електронною густиною. Ранні спроби його впровадження були ускладнені відсутністю відповідного обладнання, що призводило до неправильної реєстрації через послідовне отримання, з низькою просторовою роздільною здатністю і

високою дозою опромінювання як наслідок неефективної конструкції трубки. Подальші сканери імплементували систему з одним джерелом і одним детектором, використовуючи джерело рентгенівського випромінювання, здатне змінювати значення двох пікових напруг («перемикання кВ»), аби досягнути бажаного результату. Завдяки прогресу в технології КТ, сучасні ДЕКТ-сканери мають подвійне джерело і здатні одночасно отримувати дані на двох рівнях енергії (80 і 140 кВ) за допомогою двох окремих наборів рентгенівських трубок і детекторів, розташованих під кутом від 90° до 95° один від одного. Використовуючи комбінацію незалежної модуляції струму трубки, ітераційної реконструкції та інтегрованих схем у модулі детектора, зображення високої роздільної здатності з чудовим розділенням матеріалу є можливими без збільшення дози опромінювання порівняно зі звичайним одноенергетичним скануванням. Приклади візуалізації за допомогою ДЕКТ, у тому числі з 3D-реконструкцією та розрахунками об'єму ураження, у пацієнтів з подагрою представлені на рис. 1–5 [36–39].

VI. Значення потенційних недоліків опромінення при проведенні ДЕКТ.

Сканування ДЕКТ має кілька потенційних переваг як інструмент візуалізації перед МРТ, який нещодавно використовувався для кількісного визначення розміру тофусу в рандомізованих дослідженнях. Проте, на відміну від МРТ, ДЕКТ передбачає

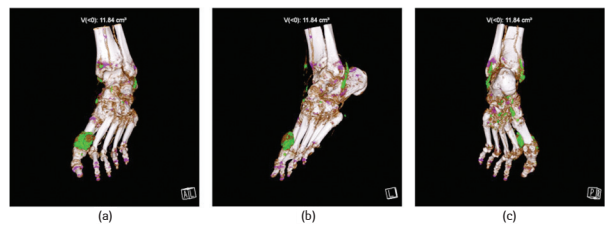


Рис. 1. 3D-реконструкція стопи з позитивним результатом моноурату натрію за допомогою ДЕКТ кристалів уратів (позначені зеленим кольором) на передньому (а), бічному (б) і задньому (с) видах. Відкладення уратів наявні навколо 1-го плюснефалангового суглоба (а, б) і навколо кількох сухожилля гомілковостопного суглоба та стопи (б, с). Автоматично розраховано об'єм відкладень уратів (11,84 см³) [36].

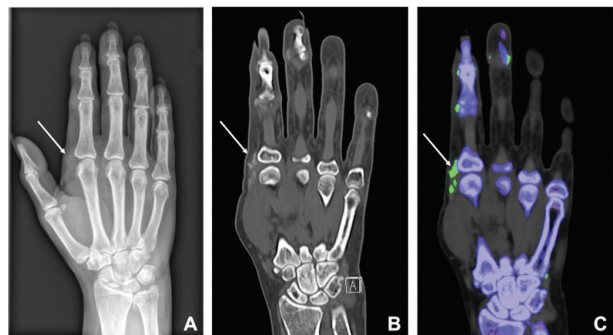


Рис. 2. 61-річна жінка з підозрою на подагру. Рентгенограма (А) в тильно-пальмарній проекції демонструє відкладення м'яких тканин на радіальній боці п'ястковофалангового суглоба (стрілка). Корональні реформи (В) відповідної КТ у шкалі сірого підтверджують ці гіперехогенні відкладення м'яких тканин (стрілка). Корональні зміни кольорових зображень ДЕКТ (С) вказують на те, що відкладення м'яких тканин містять кристали уратів [37].

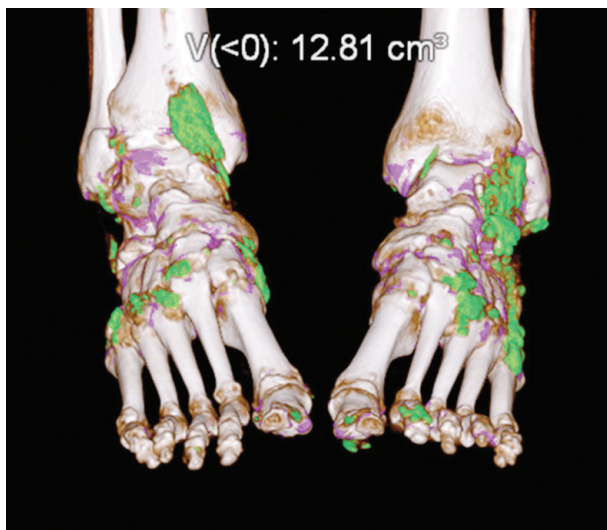


Рис. 3. ДЕКТ. Об'ємне кольорове подвійне енергетичне зображення гомілковостопного суглоба/стоп із відкладеннями уратів (зображено зеленим кольором). Автоматичне кількісне визначення об'єму уратів відображається у верхній частині зображення [38].

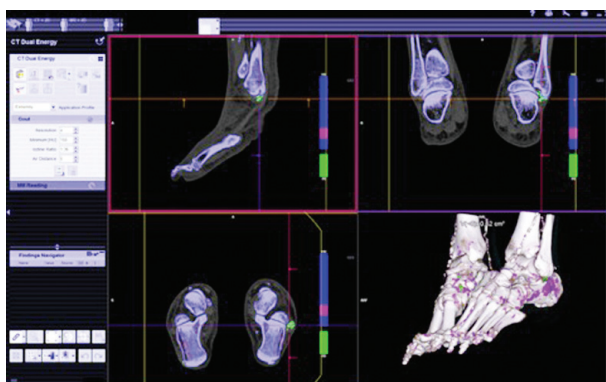


Рис. 4. Зображення з кольоровим кодуванням з постобробленими зображеннями відображаються в трьох площинах і 3D-рендерингу (створення фотореалістичного 2D-зображення з 3D-моделей). Відкладення моноурату натрію зображено зеленим кольором, який видно навколо малогомілкових сухожиль правої стопи (перехрестя). Синій колір представляє кортикальну кістку, а фіолетовий – трабекулярну. Направляючі лінії на кожній панелі можна панорамувати та обертати, щоб візуалізувати анатомію в будь-якій площині. Подібним чином тривимірне відтворене зображення дозволяє обертати довільну форму, щоб найкраще продемонструвати відкладення MSU. Інструменти обробки зображення та налаштування параметрів подвійної енергії знаходяться на панелі зліва [39].

опроміювання, і рівень його такий самий, як і звичайної КТ. Доза опромінення ДЕКТ була оцінена в 0,5 мЗв дози на скановану ділянку, а загальна кількість для всіх периферичних суглобів у пацієнта коливається від 2 до 3 мЗв, що відповідає річній глобальній середній дозі на душу населення через природне опромінення (2,4 мЗв) [40]. Для порівняння, відповідна доза опромінення органів для скринінгової маммографії, загальноновизнаного заходу охорони здоров'я для профілактики раку, оцінюється в 3 мЗв [41]. Крім того, вузький колімаційний промінь, досягнутий за допомогою КТ, забезпечує мінімальне розсіювання, на відміну від того, що створюють звичайні рентгенограми, додатково обмежуючи радіаційний вплив на інші ділянки.

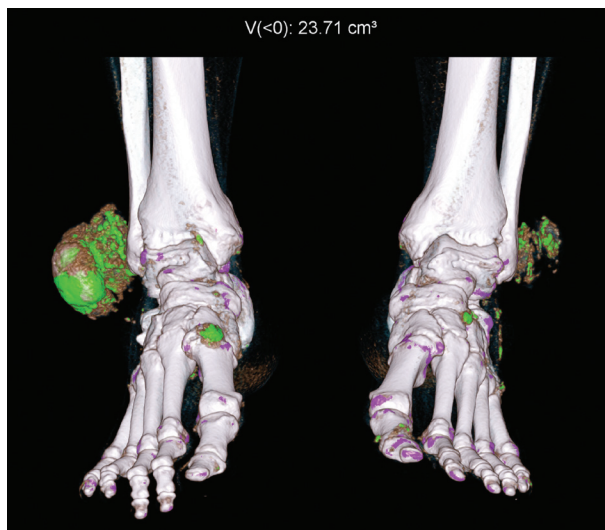


Рис. 5. Тривимірне відтворене зображення великих тофусів над бічними кісточками обох гомілковостопних суглобів, а також менших відкладень, розкиданих навколо гомілковостопних суглобів і стоп. Автоматизоване кількісне визначення об'єму уратів відображається у верхній частині зображення [39].

ВИСНОВКИ

1. ДЕКТ — новий сучасний метод діагностики та моніторингу кристалів моноурату натрію при подагрі, який вже широко використовують в ревматології. Це багатообіцяюче дослідження, яке має перевагу в диференціюванні відкладень кристалів уратів від сполучних тканин і від кальційвмісних мінеральних структур.

2. У Рекомендаціях EULAR 2018 р. щодо діагностики подагри вперше було показано, що поряд з УЗД, ДЕКТ дозволяє проводити ідентифікацію кристалів моноурату натрію в тканинах хворих на подагру. У Рекомендаціях 2023 р. EULAR/ACR щодо використання візуалізації в клінічній практиці мікрокристалічних артропатій вказано на можливість використання ДЕКТ для моніторингу запалення, пошкодження тканин або відкладення кристалів при подагрі.

3. Чутливість та специфічність ДЕКТ є вищою, ніж УЗД, і коливається в межах 0,71–0,97 та 0,84–0,95.

4. Відкладення кристалів уратів за допомогою ДЕКТ найчастіше виявляють в 1-му і (рідше) в 3-му та 4-му метатарсофалангових суглобах. Згідно з Рекомендаціями 2023 р., при виявленні кристалів уратів під час ДЕКТ аналіз синовіальної рідини не потрібен для підтвердження діагнозу подагри, хоча за можливості пункцію суглоба слід робити завжди.

5. ДЕКТ можна використовувати для моніторингу відкладення кристалів (1 раз на рік). Доза опромінення ДЕКТ відповідає річній глобальній середній дозі на душу населення через природне опромінення (2,4 мЗв).

6. Візуалізація мікрокристалічної артропатії за допомогою ДЕКТ може допомогти пацієнтам зрозуміти свій стан і підвищити прихильність до лікування подагри.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Johnson T. R., Weckbach S., Kellner H. et al. (2007) Clinical image: Dual-energy computed tomographic molecular imaging of gout. *Arthritis and rheumatism*, 56(8): 2809. doi.org/10.1002/art.22803.

2. **Choi H.K., Al-Arfaj A.M., Eftekhari A. et al.** (2009) Dual energy computed tomography in tophaceous gout. *Annals of the rheumatic diseases*, 68(10): 1609–1612. doi.org/10.1136/ard.2008.099713.
3. **Richette P., Doherty M., Pascual E. et al.** (2020) 2018 updated European League Against Rheumatism evidence-based recommendations for the diagnosis of gout. *Annals of the rheumatic diseases*, 79(1): 31–38. doi.org/10.1136/annrheumdis-2019-215315.
4. **Ogdie A., Taylor W.J., Weatherall M. et al.** (2015) Imaging modalities for the classification of gout: systematic literature review and meta-analysis. *Annals of the rheumatic diseases*, 74(10): 1868–1874. doi.org/10.1136/annrheumdis-2014-205431.
5. **Filippucci E., Cipolletta E., Sirotti S. et al.** (2024) Optimizing the Use of Ultrasound in Gout: A Review from the Ground Up. *Gout, Urate, and Crystal Deposition Disease*; 2(2): 86–100. doi.org/10.3390/gucdd2020009.
6. **Sapsford M., Gamble G.D., Aati O. et al.** (2017) Relationship of bone erosion with the urate and soft tissue components of the tophus in gout: a dual energy computed tomography study. *Rheumatology*; 56: 129–33. doi:10.1093/rheumatology/kew.
7. **Towiwat P., Doyle A.J., Gamble G.D. et al.** (2016) Urate crystal deposition and bone erosion in gout: 'inside-out' or 'outside-in'? A dual-energy computed tomography study. *Arthritis Res. Ther.*; 18. doi:10.1186/s13075-016-1105-z.
8. **Bayat S., Aati O., Rech J. et al.** (2016) Development of a dual-energy computed tomography scoring system for measurement of urate deposition in gout. *Arthritis Care Res.*; 68: 769–75. doi:10.1002/acr.22754.
9. **Dalbeth N., House M.E., Aati O. et al.** (2015) Urate crystal deposition in asymptomatic hyperuricaemia and symptomatic gout: a dual energy CT study. *Ann. Rheum. Dis.*; 74: 908–11. doi:10.1136/annrheumdis-2014-206397.
10. **Baer A.N., Kurano T., Thakur U.J. et al.** (2016) Dual-energy computed tomography has limited sensitivity for non-tophaceous gout: a comparison study with tophaceous gout. *BMC Musculoskelet. Disord.*; 17. doi:10.1186/s12891-016-0943-9.
11. **Manger B., Lell M., Wacker J. et al.** (2012) Detection of peri-articular urate deposits with dual energy CT in patients with acute gouty arthritis. *Ann. Rheum. Dis.*; 71: 470–2. doi:10.1136/ard.2011.154054.
12. **Bongartz T., Glazebrook K.N., Kavros S.J. et al.** (2015) Dual-energy CT for the diagnosis of gout: an accuracy and diagnostic yield study. *Ann. Rheum. Dis.*; 74: 1072–7. doi:10.1136/annrheumdis-2013-205095.
13. **Taylor W.J., Fransen J., Jansen T.L. et al.** (2015) Study for updated gout classification criteria: identification of features to classify gout. *Arthritis Care Res.*; 67: 1304–15. doi:10.1002/acr.22585.
14. **Ogdie A., Taylor W.J., Weatherall M. et al.** (2015) Imaging modalities for the classification of gout: systematic literature review and meta-analysis. *Ann. Rheum. Dis.*; 74: 1868–74. doi:10.1136/annrheumdis-2014-205431.
15. **Ogdie A., Taylor W.J., Neogi T. et al.** (2017) Performance of ultrasound in the diagnosis of gout in a multicenter study: comparison with monosodium urate monohydrate crystal analysis as the gold standard. *Arthritis Rheumatol.*; 69: 429–38. doi:10.1002/art.39959.
16. **Dalbeth N., Nicolau S., Baumgartner S. et al.** (2018) Presence of monosodium urate crystal deposition by dual-energy CT in patients with gout treated with allopurinol. *Ann. Rheum. Dis.*; 77: 364–70. doi:10.1136/annrheumdis-2017-212046.
17. **Huppertz A., Hermann K.-G.A., Diekhoff T. et al.** (2014) Systemic staging for urate crystal deposits with dual-energy CT and ultrasound in patients with suspected gout. *Rheumatol. Int.*; 34: 763–71. doi:10.1007/s00296-014-2979-1.
18. **Gruber M., Bodner G., Rath E. et al.** (2014) Dual-energy computed tomography compared with ultrasound in the diagnosis of gout. *Rheumatology*; 53: 173–9. doi:10.1093/rheumatology/ket341.
19. **Zhu L., Wu H., Wu X. et al.** (2015) Comparison between dual-energy computed tomography and ultrasound in the diagnosis of gout of various joints. *Acad. Radiol.*; 22: 1497–502. doi:10.1016/j.acra.2015.08.010.
20. **Pascart T., Grandjean A., Norberciak L. et al.** (2017) Ultrasonography and dual-energy computed tomography provide different quantification of urate burden in gout: results from a cross-sectional study. *Arthritis Res. Ther.*; 19. doi:10.1186/s13075-017-1381-2.
21. **Mallinson P.I., Coupal T., Reisinger C. et al.** (2014) Artifacts in dual-energy CT gout protocol: a review of 50 suspected cases with an artifact identification guide. *AJR Am. J. Roentgenol.*; 203: W103–W109. doi:10.2214/AJR.13.11396.
22. **Coupal T.M., Mallinson P.I., Gershony S.L. et al.** (2016) Getting the most from your dual-energy scanner: recognizing, reducing, and eliminating artifacts. *AJR Am. J. Roentgenol.*; 206: 119–28. doi:10.2214/AJR.14.13901.
23. **Ebstein E., Forien M., Norkuviene E. et al.** (2019) Ultrasound evaluation in follow-up of urate-lowering therapy in gout: the USEFUL study. *Rheumatology (Oxford, England)*, 58(3): 410–417. doi.org/10.1093/rheumatology/key303.
24. **Peiteado D., Villalba A., Martín-Mola E. et al.** (2017) Ultrasound sensitivity to changes in gout: a longitudinal study after two years of treatment. *Clinical and experimental rheumatology*, 35(5): 746–751.
25. **Araujo E.G., Bayat S., Petsch C. et al.** (2015) Tophus resolution with pegloticase: a prospective dual-energy CT study. *RMD open*, 1(1): e000075. doi.org/10.1136/rmdopen-2015-000075.
26. **Mandl P., D'Agostino M.A., Navarro-Compán V. et al.** (2024) 2023 EULAR recommendations on imaging in diagnosis and management of crystal-induced arthropathies in clinical practice. *Annals of the rheumatic diseases*, 83(6): 752–759. doi.org/10.1136/ard-2023-224771.
27. **Gessi I., Sakellariou G., Wildner B. et al.** (2024) Systematic literature review to inform the EULAR recommendations for the use of imaging in crystal-induced arthropathies in clinical practice. *Annals of the rheumatic diseases*, ard-2023-225247. Advance online publication. doi.org/10.1136/ard-2023-225247.
28. **Dalbeth N., House M.E., Aati O. et al.** (2015) Urate crystal deposition in asymptomatic hyperuricaemia and symptomatic gout: a dual energy CT study. *Annals of the rheumatic diseases*, 74(5): 908–911. doi.org/10.1136/annrheumdis-2014-206397.
29. **Gruber M., Bodner G., Rath E. et al.** (2014) Dual-energy computed tomography compared with ultrasound in the diagnosis of gout. *Rheumatology (Oxford, England)*, 53(1): 173–179. doi.org/10.1093/rheumatology/ket341.
30. **Dalbeth N., Aati O., Kalluru R. et al.** (2015) Relationship between structural joint damage and urate deposition in gout: a plain radiography and dual-energy CT study. *Annals of the rheumatic diseases*, 74(6): 1030–1036. doi.org/10.1136/annrheumdis-2013-204273.
31. **Roddy E.** (2011) Revisiting the pathogenesis of podagra: why does gout target the foot?. *Journal of foot and ankle research*, 4(1): 13. doi.org/10.1186/1757-1146-4-13.
32. **Roddy E., Zhang W., Doherty M.** (2007) Are joints affected by gout also affected by osteoarthritis? *Ann. Rheum. Dis.* Oct; 66(10): 1374–7. doi: 10.1136/ard.2006.063768. Epub 2007 Feb 6. PMID: 17284542; PMCID: PMC1994292.
33. **Christiansen S.N., Müller F.C., Østergaard M. et al.** (2020) Dual-energy CT in gout patients: Do all colour-coded lesions actually represent monosodium urate crystals?. *Arthritis Res. Ther.*, 22: 212. doi.org/10.1186/s13075-020-02283-z.
34. **Jayakumar D., Sehra S., Anand S. et al.** (2017) Role of Dual Energy Computed Tomography Imaging in the Diagnosis of Gout. *Cureus*, 9(1): e985. doi.org/10.7759/cureus.985.
35. **Sagdeo A., Askari A., Singh J. et al.** (2021) Dual energy computed tomography in gout: our experience. *International Journal of Current Research and Review*, 13(14): 1–7. DOI 10.31782/ijcrr.2021.131432.
36. **Sotniczuk M., Nowakowska-Płaza M., Wroński J. et al.** (2022) The Clinical Utility of Dual-Energy Computed Tomography in the Diagnosis of Gout-A Cross-Sectional Study. *Journal of clinical medicine*, 11(17): 5249. doi.org/10.3390/jcm11175249.
37. **Kupfer S., Winkhofer S., Becker A.S. et al.** (2018) Gouty arthritis: Can we avoid unnecessary dual-energy CT examinations using prior radiographs?. *PLoS one*, 13(7): e0200473. doi.org/10.1371/journal.pone.0200473.
38. **Carotti M., Salaffi F., Filippucci E. et al.** (2020) Clinical utility of Dual Energy Computed Tomography in gout: current concepts

and applications. *Acta bio-medica : Atenei Parmensis*, 91(8-S): 116–124. doi.org/10.23750/abm.v91i8-S.9942.

39. **Chou H., Chin T.Y., Peh W.C.** (2017) Dual-energy CT in gout – A review of current concepts and applications. *Journal of medical radiation sciences*, 64(1): 41–51. doi.org/10.1002/jmrs.223.

40. **Choi H.K., Burns L.C., Shojania K. et al.** (2012) Dual energy CT in gout: a prospective validation study. *Annals of the rheumatic diseases*, 71(9): 1466–1471. doi.org/10.1136/annrheumdis-2011-200976.

41. **Brenner D.J., Hall E.J.** (2007) Computed tomography an increasing source of radiation exposure. *The New England journal of medicine*, 357(22): 2277–2284. doi.org/10.1056/NEJMra072149.

DUAL-ENERGY COMPUTED TOMOGRAPHY: NEW STANDARD IN DIAGNOSING GOUT

**V.M. Kovalenko¹, A.M. Gnylorybov²,
Iu.V. Biliavska¹, O.V. Bogatyrova³**

¹State University «National Scientific Center «Institute of Cardiology, Clinical and Regenerative Medicine named after Academician M.D. Strazheska» National Academy of Sciences of Ukraine

²National Institute of Cardiovascular Surgery named after M.M. Amosov National Academy of Sciences of Ukraine

³Department of Biomedical Disciplines of Donetsk National Medical University, Kropyvnytskyi

Abstract. *The article is devoted to a new method for diagnosing gout – dual-energy computed tomography (DECT). This innovative method significantly improves the accuracy of detecting*

*urate crystals, which is a key factor in diagnosing gout. DECT uses two different energy levels to obtain images, allowing clear differentiation of urates from other tissues and deposits, particularly calcium crystals. **Methods.** The article analyzes the place and role of DECT in current recommendations for the diagnosis and monitoring of gout patients. The use of DECT avoids invasive procedures such as joint puncture and provides faster and more accurate diagnostic conclusions. The principles underlying the visualization of uric acid crystals are described, contributing to improved diagnostics in cases of unclear clinical manifestations of gout. The article also reviews clinical research results confirming the efficacy and reliability of DECT in diagnosing gout, as well as the economic aspects and disadvantages of the method. **Results.** The method demonstrates high sensitivity and specificity, making it the preferred choice in complex diagnostic cases. Economic aspects of DECT usage are also analyzed, including equipment and procedure costs. In **conclusion**, the authors emphasize that the introduction of DECT into clinical practice can significantly reduce the need for invasive procedures, increase diagnostic efficiency and accuracy, and possibly improve disease prognosis.*

Key words: gout, sodium monourate crystals, tophi, dual-energy computed tomography, sensitivity and specificity.

Відомості про авторів:

Коваленко Володимир Миколайович — академік, професор, завідувач відділу некоронарних хвороб серця, ревматології та терапії державної установи «Національний науковий центр «Інститут кардіології, клінічної та регенеративної медицини імені академіка М.Д. Стражеска» НАМН України. ORCID ID: 0000-0003-3802-9207

Гнилорібов Андрій Михайлович — доктор медичних наук, професор науково-навчального відділу, Національний інститут серцево-судинної хірургії імені М.М. Амосова НАМН. E-mail: andriy.gnylorybov@gmail.com. ORCID ID: 0000-0001-5989-5548.

Білявська Юлія Вікторівна — кандидатка медичних наук, старша наукова співробітниця відділу некоронарних хвороб серця, ревматології та терапії ДУ «Національний науковий центр «Інститут кардіології, клінічної та регенеративної медицини імені академіка М.Д. Стражеска» НАМН України. ORCID ID: 0009-005-0072-1814

Богатирьова О.В. — кандидатка біологічних наук, доцентка кафедри біомедичних дисциплін Донецького національного медичного університету, м. Кропивницький. ORCID ID: 0000-0002-9640-8494