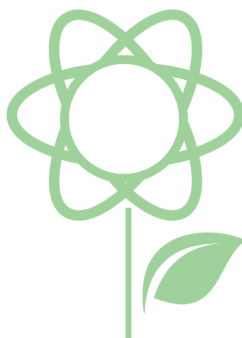


©2026

Ірина Баланюк,
Анна-Луїза Бойку,
Анна Нікульча,
Вероніка Яворська



Надійшла до редакції 24 січня 2026р.
Прийнята до друку 26 травня 2026р.
Опубліковано на сайті 17 червня 2026р.

УДК 616-073.755.4

DOI: [10.24061/3083-5887.j.nmsmme.2026.4.1.3](https://doi.org/10.24061/3083-5887.j.nmsmme.2026.4.1.3)

Сцинтиграфія як метод функціональної діагностики в сучасній медицині

Ірина Баланюк

 ID: [0000-0003-1146-4065](https://orcid.org/0000-0003-1146-4065) @: balanyk85@gmail.com

Анна-Луїза Бойку

 ID: [0009-0006-2392-6609](https://orcid.org/0009-0006-2392-6609) @: Boiku.Anna.med@bsmu.edu.ua

Анна Нікульча

 ID: [0009-0005-2453-2612](https://orcid.org/0009-0005-2453-2612) @: nikylha99.med@bsmu.edu.ua

Вероніка Яворська

 ID: [0009-0004-1334-0650](https://orcid.org/0009-0004-1334-0650) @: yavorska.veronika.med@bsmu.edu.ua

Буковинський державний медичний університет, Чернівці, Україна

Ключові слова:

сцинтиграфія,
радіофармацевти,
сцинтилятори,
однофотонна емісійна
комп'ютерна томографія,
позитрон-емісійна томо-
графія,
перфузійна сцинтиграфія
міокарда.

Анотація

Стаття присвячена сцинтиграфії як одному з важливих методів функціональної діагностики в сучасній ядерній медицині. Метою роботи є узагальнення фізичних основ методу, його технічних можливостей, історичного розвитку та основних напрямків клінічного застосування. Сцинтиграфія ґрунтується на використанні радіоактивних ізотопів у складі радіофармацевтичних препаратів, які після введення в організм розподіляються в тканинах відповідно до їхніх фізіологічних і біохімічних властивостей. Під час радіоактивного розпаду радіонукліди випромінюють гамма-кванти, що реєструються сцинтиляційними детекторами гамма-камери. Отримані сигнали перетворюються на зображення, яке відображає функціональний стан органів і систем. Особливе місце серед радіонуклідів посідає технецій-99m, що має оптимальні фізичні характеристики для медичної діагностики.

У статті висвітлено основні етапи становлення сцинтиграфії: від створення перших штучних радіоізотопів і автоматизованих сканерів у середині ХХ століття до розробки гамма-камери та впровадження сучасних томографічних методів, зокрема однофотонної емісійної комп'ютерної томографії та позитронно-емісійної томографії.

Цитувати як:

Баланюк І., Бойку А.-Л., Нікульча А., Яворська В. Сцинтиграфія як метод функціональної діагностики в сучасній медицині. *Природничі, математичні науки та освіта в медицині* 1(4) 2026 31-42.

DOI: [10.24061/3083-5887.j.nmsmme.2026.4.1.3](https://doi.org/10.24061/3083-5887.j.nmsmme.2026.4.1.3)



Розділ 1. Природничі науки в медицині
Section 1. Natural sciences in medicine


Окрему увагу приділено сучасним технологічним рішенням, таким як гібридні системи ОФЕКТ/КТ та ПЕТ/КТ, які поєднують функціональну та анатомічну візуалізацію і значно підвищують точність діагностики.

Проаналізовано основні групи радіофармацевтичних препаратів та їх використання для дослідження різних органів і систем організму. Наведено приклади клінічного застосування сцинтиграфії в кардіології, онкології, ендокринології, нефрології, пульмонології та неврології, що демонструє універсальність методу та його значення для оцінки функціонального стану органів, виявлення патологічних змін і моніторингу лікування. Також розглянуто основні обмеження методу, пов'язані з променевим навантаженням і відносно нижчою просторовою роздільною здатністю порівняно з деякими іншими методами візуалізації.


Отже, подальший розвиток сцинтиграфії пов'язаний із удосконаленням детекторних технологій, створенням нових високоспецифічних радіофармацевтичних препаратів та використанням методів штучного інтелекту для обробки медичних зображень. Це відкриває нові можливості для ранньої діагностики захворювань, розвитку молекулярної візуалізації та впровадження підходів персоналізованої медицини.

Scintigraphy as a method of functional diagnostics in modern medicine


Iryna Balaniuk

 [0000-0003-1146-4065](https://orcid.org/0000-0003-1146-4065) @: balanyk85@gmail.com

Anna-Luiza Boiku

 [0009-0006-2392-6609](https://orcid.org/0009-0006-2392-6609) @: Boiku.Annamed@bsmu.edu.ua

Anna Nikulcha

 [0009-0005-2453-2612](https://orcid.org/0009-0005-2453-2612) @: nikylha99.med@bsmu.edu.ua

Veronika Yavorska

 [0009-0004-1334-0650](https://orcid.org/0009-0004-1334-0650) @: yavorska.veronika.med@bsmu.edu.ua

Bukovinian State Medical University, Chernivtsi, Ukraine

Keywords:

scintigraphy,
radioacticals,
scintillators,
single-photon emission
computed tomography,
positron emission tomography,
myocardial perfusion
scintigraphy.

Abstract

The article is devoted to scintigraphy as one of the important methods of functional diagnostics in modern nuclear medicine. The aim of the work is to generalize the physical foundations of the method, its technical capabilities, historical development and main directions of clinical application. Scintigraphy is based on the use of radioactive isotopes in the composition of radiopharmaceuticals, which after introduction into the body are distributed in tissues according to their physiological and biochemical properties. During radioactive decay, radionuclides emit gamma quanta, which are registered by scintillation detectors of a gamma camera. The received signals are converted into an image that reflects the functional state of organs and systems. Technetium-99m occupies a special place among radionuclides, which has optimal physical characteristics for medical diagnostics.

The article highlights the main stages of the development of scintigraphy: from the creation of the first artificial radioisotopes and automated scanners in the mid-20th century to the development of the gamma camera and the introduction of modern tomographic methods, in particular single-photon emission computed tomography and positron emission tomography.

Розділ 1. Природничі науки в медицині
Section 1. Natural sciences in medicine

Special attention is paid to modern technological solutions, such as hybrid SPECT/CT and PET/CT systems, which combine functional and anatomical visualization and significantly increase the accuracy of diagnostics. The main groups of radiopharmaceuticals and their use for the study of various organs and body systems are analyzed. Examples of clinical application of scintigraphy in cardiology, oncology, endocrinology, nephrology, pulmonology and neurology are given, which demonstrates the versatility of the method and its importance for assessing the functional state of organs, detecting pathological changes and monitoring treatment. The main limitations of the method, related to radiation exposure and relatively lower spatial resolution compared to some other imaging methods, are also considered.

Therefore, the further development of scintigraphy is associated with the improvement of detector technologies, the creation of new highly specific radiopharmaceuticals, and the use of artificial intelligence methods for medical image processing. This opens up new opportunities for early diagnosis of diseases, the development of molecular imaging, and the implementation of personalized medicine approaches.

Зміст

Вступ	34
Основна частина	34
Висновки	40
Список використаних джерел	41

Перелік скорочень:

- КТ - комп'ютерна томографія
ОФЕКТ - однофотонна емісійна КТ
ПЕТ - позитрон-емісійна томографія
CZT - Cadmium-Zink Telluride (потрійний твердий розчин телурид кадмію-ртуті)
NaI(Tl) - йодид натрію, легований талієм
МРТ - магнітно-резонансна томографія
технецій-99m + транспортні речовини, які доставляють ізотоп («мітку») до тканин:
-MDP - Метилендифосфонат (MDP/МДФ) зв'язується з кістковою тканиною.
-MAG3 - меркаптоацетилтригліцин - швидко виводиться нирками
-DMSA - димеркаптобурштинова кислота - для статичної сцинтиграфії нирок
-МАА - макроагрегований альбумін - мікроскопічні частинки білка
-МІБІ (сестамібі / метоксиізобутилізонітрил)
DOTA-ТОС - DOTA - це хелатний агент (1,4,7,10-тетраазациклододекан-1,4,7,10-тетраоцтова кислота). ТОС - це скорочення від D-Phe-Tyr-Octreotide (D-фенілаланін-тирозин-октреотид).
PSMA - Prostate-Specific Membrane Antigen/ простатичний специфічний мембранний антиген
ПСМ - Перфузійна сцинтиграфія міокарда
ATTR-амілоїдоз - транстиретиновий амілоїдоз
MUGA - MUltiGated Acquisition
ФДГ-ПЕТ/КТ - ПЕТ із фтордезоксиглюкозою (ФДГ)
ПСМА/PSMA - простатоспецифічний мембранний антиген
PRRT - пептидно-рецепторна радіонуклідна терапія
V/Q - співвідношення між вентиляцією (V - надходження повітря) та перфузією (Q - кровотік) у легенях

МІБГ - метайодобензилгуанідин
ДТПА - діетилентріамінпентаоцтова кислота
ТЕЛА - тромбоемболія легеневої артерії
ГМПАО - гексаметилпропіленаміноксим
HIDA - Hepatobiliary Iminodiacetic Acid
BRIDA - Biliary Iminodiacetic Acid
ALARA - as low as reasonably achievable

Вступ

У сучасній медицині методи функціональної діагностики відіграють дедалі важливішу роль у ранньому виявленні патологічних змін, коли анатомічні порушення ще не виражені або мінімальні. Функціональні порушення нерідко передують структурним змінам на роки, що визначає принципову перевагу методів ядерної медицини над суто анатомічними методами візуалізації у певних клінічних ситуаціях [1, 2].

Сцинтиграфія як один з основних методів ядерної медицини базується на введенні в організм радіоактивних фармацевтичних препаратів і реєстрації їхнього розподілу зовнішніми детекторами. На відміну від рентгенологічних методів, які переважно візуалізують анатомічну структуру, сцинтиграфія дозволяє оцінити функціональний стан органів, метаболічні процеси, перфузію тканин та рецепторний статус патологічних вогнищ [2, 3].

Мета роботи - розглянути фізичні основи сцинтиграфії, клас радіофармпрепаратів, що використовуються, технічні аспекти гамма-камер та гібридних систем, історію розвитку методу та його сучасні клінічні застосування в різних галузях медицини для формування комплексного розуміння ролі радіонуклідної діагностики в сучасній медицині та підвищення обізнаності медичних працівників щодо можливостей функціональних методів візуалізації.

Основна частина

Фізичні основи методу

Сцинтиграфія базується на фундаментальних принципах ядерної фізики та взаємодії іонізуючого випромінювання з речовиною [1]. В основі методу лежить використання радіоактивних ізотопів, які

Сучасна ядерна медицина пройшла тривалий шлях еволюції від примітивних лічильних пристроїв до складних гібридних систем ОФЕКТ/КТ та ПЕТ/КТ, здатних інтегрувати функціональну та структурну інформацію в єдиному дослідженні. Розробка нових радіофармпрепаратів – від органоспецифічних сполук технецію-99m до таргетних лігандів рецепторів та терапевтичних агентів – відкрила нові горизонти персоналізованої медицини [4, 5, 6].

Актуальність даної теми зумовлена зростаючою кількістю досліджень із застосуванням методів ядерної медицини у всьому світі та недостатньою обізнаністю медичних фахівців різних спеціальностей щодо можливостей та обмежень радіонуклідних методів діагностики. Розуміння фізичних принципів, технічних особливостей та клінічних показань до сцинтиграфії є важливою передумовою раціонального використання цього потужного діагностичного інструменту [7, 8].

вводяться в організм у складі радіофармпрепаратів і розподіляються в органах та тканинах залежно від їх фізіологічних та метаболічних властивостей. Розпадаючись, радіонукліди випромінюють гам-

Розділ 1. Природничі науки в медицині
Section 1. Natural sciences in medicine

ма-кванти, що реєструються зовнішніми детекторами і слугують основою для побудови діагностичного зображення [1, 9].

Найпоширенішим радіонуклідом у діагностичних цілях є технецій-99m завдяки його оптимальній енергії гамма-випромінювання (140 кеВ), короткому періоду напіврозпаду (6 годин) та здатності утворювати різноманітні радіофармпрепарати для візуалізації практично всіх органів і систем організму [2, 5]. Ізомерний перехід з технецію-99m до технецію-99 супроводжується виключно гамма-випромінюванням без β -частинок, що мінімізує поглинену дозу тканинами та робить ізотоп ідеальним для діагностики [1, 10].

Процес детекції випромінювання здійснюється за допомогою сцинтиляційних кристалів, найчастіше йодиду натрію, активованого талієм NaI(Tl).

Гамма-квант, потрапляючи в кристал, спричиняє короткочасне світіння

Історичний розвиток методу

Витоки ядерної медицини сягають 1930-х років, коли Ернестом Лоуренсом було винайдено циклотрон, що дозволив синтезувати штучні радіоізотопи [3]. Перші діагностичні застосування радіоактивних ізотопів відносяться до 1940-х років, коли радіоактивний йод-131 був застосований для дослідження функції щитоподібної залози. Проте практичне клінічне використання сцинтиграфічних методів розпочалося у 1950-х роках.

Революційним досягненням стало створення у 1950 році Бенедиктом Касеном першого автоматизованого реклінеарного сканера – пристрою, що здійснював послідовне сканування досліджуваної ділянки тіла й реєстрував розподіл радіоактивності у вигляді двовимірного зображення [3]. Попри обмежену просторову роздільну здатність та значний час дослідження, цей пристрій заклав основи сучасної сцинтиграфії.

Справжньою революцією стало ви-

сцинтиляцію, інтенсивність якої пропорційна енергії фотона [1]. Це світло за допомогою фотопомножувачів перетворюється на електричний сигнал, що обробляється комп'ютерною системою. Колімація випромінювання дозволяє визначити напрямок приходу гамма-квантів і сформуванати просторове зображення розподілу радіофармпрепарату [2].

Енергетична роздільна здатність детекторної системи має принципове значення для якості зображення. Типова роздільна здатність NaI(Tl)-детекторів становить близько 10% для енергії 140 кеВ, що дозволяє ефективно відокремлювати первинне випромінювання від розсіяного [9]. Напівпровідникові детектори на основі кадмій-цинк-телуриду (CZT) забезпечують значно кращу енергетичну роздільну здатність (3–5%) і поступово впроваджуються в сучасні гамма-камери [1, 15].

найдення у 1957 році Хелом Агером (Hal Anger) гамма-камери - пристрою, що дозволяв одночасно реєструвати гамма-випромінювання від усієї досліджуваної ділянки. Камера Агера стала прообразом усіх сучасних гамма-камер і принципово не змінила своєї архітектури до сьогодні, хоча технічні характеристики покращилися багаторазово [3, 11].

У 1970-х роках вдосконалення електроніки та розвиток комп'ютерних технологій призвели до появи томографічних методів ядерної медицини. ОФЕКТ забезпечила тривимірну реконструкцію розподілу радіофармпрепарату, значно підвищивши просторову роздільну здатність та контрастність зображень [2, 3].

Паралельно розвивався метод ПЕТ, що базується на реєстрації двох протилежно спрямованих фотонів анігіляційного випромінювання з енергією по 511 кеВ кожен [4]. Поєднання ПЕТ з комп'ютерною томографією у гібридних систе-

Розділ 1. Природничі науки в медицині
Section 1. Natural sciences in medicine

мах ПЕТ/КТ на початку 2000-х років стало справжнім проривом в онкологічній діагностиці, дозволивши одночасно оцінювати метаболічні та анатомічні характеристики пухлин [4, 10, 12].

Сучасним досягненням є інтеграція

ПЕТ з магнітно-резонансною томографією у системах ПЕТ/МРТ, що поєднує метаболічну та анатомічну інформацію з чудовою м'якотканинною контрастністю МРТ при відсутності додаткового іонізуючого випромінювання від КТ-компоненти [12, 14].

Технічні аспекти сучасної сцинтиграфії

Сучасні гамма-камери являють собою складні технічні комплекси з великоформатними детекторами (зазвичай діаметром 38–59 см), багатоканальними коліматорами різних типів, потужними процесорами обробки зображень та спеціалізованим програмним забезпеченням [1, 2]. Більшість клінічних систем оснащені двома детекторними головами, що дозволяє проводити дослідження з двох протилежних або перпендикулярних проєкцій одночасно.

Коліматор є ключовим елементом гамма-камери, що визначає просторову роздільну здатність та чутливість системи. Паралельноканальні коліматори низькоенергетичного діапазону забезпечують оптимальні характеристики для досліджень з технецієм-99m, тоді як коліматори середньоенергетичного та високоенергетичного діапазонів застосовуються для радіонуклідів з вищою енергією гамма-випромінювання [1, 9].

Планарна сцинтиграфія дозво-

ляє отримувати двовимірні проєкційні зображення в різних стандартних проєкціях, тоді як ОФЕКТ забезпечує тривимірну реконструкцію просторового розподілу радіоактивності з можливістю аналізу довільних зрізів [2]. Сучасні алгоритми реконструкції ОФЕКТ включають методи ітеративного відновлення зображень з корекцією поглинання, розсіювання та рухових артефактів.

Гібридні системи ОФЕКТ/КТ поєднують переваги функціональної візуалізації та точної анатомічної локалізації. Вбудована КТ-компонента виконує подвійну функцію: слугує для атенуаційної корекції сцинтиграфічних даних і забезпечує анатомічну карту для точної локалізації вогнищ накопичення радіофармпрепарату [7, 10]. Сучасні системи ПЕТ/КТ поєднують 64- та 128-зрізові КТ з високочутливими ПЕТ-детекторами, забезпечуючи просторову роздільну здатність ПЕТ близько 4–6 мм [4, 12].

Радіофармпрепарати та їх застосування

Радіофармпрепарат – це стерильний, апірогенний радіоактивний лікарський засіб, призначений для введення в організм людини з діагностичною або терапевтичною метою. Вибір радіофармпрепарату визначається метою дослідження та біологічними характеристиками досліджуваного органу чи патологічного процесу [2, 5]. Будь-який радіофармпрепарат складається з двох основних компонентів: радіонукліда, що слугує джерелом гамма-випромінювання та хімічної молекули-носія, що визначає специфічність розподілу в організмі.

Технецій-99m є ключовим радіонуклідом у ядерній медицині і входить до складу радіофармпрепаратів для досліджень кісток (технецій-99m-MDP), нирок (технецій-99m-MAG3, DMSA), міокарда (технецій-99m-сестамібі, тетрофосмін), легень (технецій-99m-ММА), печінки (технецій-99m-колоїд), мозку та ін. [5]. Генератори молібден-99/технецій-99m, що регулярно поповнюються, забезпечують надійне постачання ізотопу в ядерно-медичні підрозділи без необхідності наявності прискорювача частинок [2].

Радіоактивний йод-123 та йод-131

Розділ 1. Природничі науки в медицині
Section 1. Natural sciences in medicine

застосовуються для досліджень щитоподібної залози: йод-123 завдяки кращим дозиметричним характеристикам переважно використовується для діагностичної сцинтиграфії, тоді як йод-131 – для терапії диференційованого раку щитоподібної залози та токсичного зоба [5, 16].

Позитрон-випромінюючі радіонукліди для ПЕТ включають фтор-18, вуглець-11, азот-13 та кисень-15, що потребують наявності циклотрона поблизу клініки через короткі періоди напіврозпаду [4]. Галій-68, отримуваний із генератора германій-68/галій-68, дозволяє проводити ПЕТ-дослідження без власного циклотрона та застосовується для лабелю-

вання пептидів (наприклад, DOTA-ТОС для нейроендокринних пухлин) [6, 17].

Перспективним напрямком є розробка специфічних лігандів для молекулярної візуалізації - радіомічених антитіл, пептидів, аптамерів та малих молекул, що зв'язуються з конкретними рецепторами або молекулярними маркерами патологічних процесів [6, 7]. Радіофармпрепарати на основі лютецію-177 (зокрема, PSMA-617 для раку передміхурової залози та DOTA-ТОС для нейроендокринних пухлин) застосовуються в теранозі – одночасній діагностиці та таргетній радіонуклідній терапії [6, 18].

Клінічні застосування сцинтиграфії

Кардіологія

ПСМ є важливим методом функціональної оцінки коронарного кровотоку та відіграє ключову роль у діагностиці ішемічної хвороби серця [8]. Метод дозволяє виявляти зони ішемії та рубцевих змін міокарда, оцінювати глобальну та регіональну скоротливість лівого шлуночка, прогнозувати ризик серцево-судинних подій та відбирати пацієнтів для ревазуляризації [8, 19].

Стрес-тест при ПСМ може бути фізичним (навантаження на тредмілі або велоергометрі) або фармакологічним (аденозин, дипіридамо, добутамін). Порівняння перфузійних зображень у спокої та при навантаженні дозволяє виявити обратимі (ішемічні) та необоротні (рубцеві) дефекти перфузії [8]. Сучасні програмні алгоритми з автоматичним підрахунком кількісних індексів значно

стандартизували інтерпретацію ПСМ.

Сцинтиграфія з пірофосфатними препаратами технецію-99m демонструє виняткову діагностичну цінність при транстиретиновому амілоїдозі серця, досягаючи практично 100% специфічності за умови правильного клінічного контексту (відсутність моноклональних білків у крові або сечі та інтенсивне накопичення трейсера ступеня 2–3) [8, 11]. Метод замінив ендоміокардіальну біопсію як золотий стандарт діагностики ATTR-амілоїдозу в більшості клінічних ситуацій.

Радіонуклідна рівноважна вентрикулографія (MUGA) забезпечує надточну оцінку фракції викиду лівого шлуночка та глобальної скоротливості. Метод традиційно використовується для моніторингу кардіотоксичності антрациклінів та інших хіміотерапевтичних агентів [5].

Онкологія

ФДГ-ПЕТ/КТ посідає центральне місце в онкологічній діагностиці завдяки здатності виявляти метаболічно активні злоякісні вогнища в будь-якій ділянці тіла. Метод широко застосовується для первинного стадіювання злоякісних

пухлин, оцінки відповіді на хіміотерапію, виявлення рецидивів та діагностики паранеопластичного синдрому [7, 20].

Сцинтиграфія кісток із технецієм-99m-МДФ залишається широко застосовуваним методом скринінгу ме-

Розділ 1. Природничі науки в медицині
Section 1. Natural sciences in medicine

тастатичного ураження скелета при раку молочної залози, передміхурової залози, легені та нирок. Проте у деяких пухлинах, зокрема при мієломній хворобі, метод демонструє обмежену чутливість близько 66% через мінімальну остеобластичну реакцію [7, 9, 12]. У таких клінічних ситуаціях МРТ та ПЕТ/КТ з ФДГ або галій-68-ПСМА забезпечують значно кращу діагностичну точність [21].

Сцинтиграфія сторожових лімфатичних вузлів із колоїдним технецієм-99m є стандартним методом передопераційного картування та інтраоперацій-

Ендокринологія

Сцинтиграфія щитоподібної залози з технецієм-99m-пертехнетатом або йодом-123 дозволяє оцінити розміри, форму та функціональний стан залози, виявити «гарячі» (гіперфункціонуючі) та «холодні» (гіпофункціонуючі) вузли, а також залишкову тиреоїдну тканину після тиреоїдектомії [5, 16]. Тотальна сцинтиграфія тіла з йодом-131 після тиреоїдектомії є стандартним методом виявлення метастазів диференційованого раку щитоподібної залози.

Сцинтиграфія паращитоподібних залоз із технецієм-99m-МІБІ (сестамібі) в поєднанні з відстрошеною візуалізацією дозволяє локалізувати аде-

Нефрологія та урологія

Динамічна нефросцинтиграфія з технецієм-99m-МАГЗ або ДТПА забезпечує роздільну оцінку функції кожної нирки (відносна функція), оцінку ниркового кровотоку, клубочкової фільтрації та тубулярної секреції, а також виявлення обструкції сечовивідних шляхів за допомогою діуретичної нефросцинтиграфії [2, 5]. Метод є незамінним для пренатально виявленого гідронефрозу та диференційної діагностики обструктивних і необструктивних дилатацій.

ного виявлення сторожового вузла при раку молочної залози та меланомі. Метод дозволяє уникнути повної лімфодисекції у більшості пацієнтів зі своєчасно виявленими пухлинами [5, 22].

Рецепторна сцинтиграфія соматостатину (октреотид-сцинтиграфія або галій-68-DOТА-пептидне ПЕТ/КТ) є методом вибору для виявлення та стадіювання нейроендокринних пухлин, що надекспресують рецептори соматостатину [17, 23]. Метод також застосовується для відбору пацієнтів для PRRT лютецієм-177.

номи паращитоподібних залоз при первинному гіперпаратиреозі. Метод замінив інвазивні ангіографічні дослідження як передопераційну підготовку і значно полегшив мінімально інвазивну паратиреоїдектомію [5, 24].

Сцинтиграфія з метайодобензилгуанідином (МІБГ), міченим йодом-123 або йодом-131, є методом вибору для виявлення феохромоцитом, парагангліом та нейробластом. МІБГ накопичується в хромафінних клітинах через механізм захоплення катехоламінів і дозволяє виявляти як первинну пухлину, так і метастатичні вогнища в єдиному дослідженні [5].

Статична нефросцинтиграфія з технецієм-99m-ДМСА є методом вибору для виявлення паренхіматозних рубців після пієлонефриту у дітей та дорослих. Чутливість методу у виявленні кортикальних дефектів значно перевищує чутливість ультразвукового дослідження [5, 25].

Непряма радіонуклідна цистографія є безпечним і низькодозовим методом діагностики везико-уретерального рефлюксу у дітей, що дозволяє монітувати рефлюкс у динаміці з мінімальним опроміненням [5].

Пульмонологія

Вентиляційно-перфузійна (V/Q) сцинтиграфія легень залишається важливим методом діагностики ТЕЛА, особливо у вагітних та пацієнтів з протипоказаннями до КТ-ангіографії (алергія на контраст, ниркова недостатність) [2, 5]. Метод базується на порівнянні перфузії (технецій-99m-МАО) та вентиля-

ції (ксенон-133 або технецій-99m-ДТ-ПА-аерозоль) легневих сегментів.

Сучасні протоколи V/Q ОФЕКТ/КТ підвищили діагностичну точність методу при ТЕЛА та значно розширили диференційно-діагностичні можливості порівняно з планарною сцинтиграфією [26].

Неврологія

Перфузійна ОФЕКТ головного мозку з гексаметилпропіленаміноксимом технецію-99m (ГМПАО) або ДМПАО дозволяє оцінити регіональний мозковий кровотік і застосовується для діагностики ранніх стадій нейродегенеративних захворювань, диференційної діагностики деменцій, виявлення вогнищ гіперперфузії при епілепсії та оцінки мозкової смерті [2].

Сцинтиграфія з лігандами дофамінових транспортерів (DaTSCAN – йод-123-і-офлупан) є методом вибору для диференційної діагностики паркінсонізму та есенційного тремору. Метод виявляє

зменшення щільності дофамінових транспортерів у стріатумі при хворобі Паркінсона та деменції з тільцями Леві [6, 27].

ПЕТ із амілоїдними лігандами (флорбетатір, флутометамол, флорбетабен) дозволяє прижиттєво виявляти амілоїдні бляшки в мозку при хворобі Альцгеймера та інших амілоїдопатіях [14, 28]. Метод суттєво трансформує підходи до ранньої діагностики хвороби Альцгеймера та відбору пацієнтів для антиамілоїдної терапії, а також знаходить застосування в гастроентерології та інших галузях медицини.

Гепатобіліарна сцинтиграфія

Гепатобіліарна сцинтиграфія з похідними іміодіацетатної кислоти, міченими технецієм-99m (HIDA, BRIDA), дозволяє оцінити секреторну функцію гепатоцитів та прохідність жовчовивід-

них шляхів, виявити жовчний рефлюкс та холецистит [2, 5]. Метод є незамінним для діагностики жовчного міхура у новонароджених та диференційної діагностики неонатальної жовтяниці.

Сцинтиграфія шлунка

Сцинтиграфія шлунка з радіоміченою їжею використовується для оцінки швидкості евакуації вмісту шлунка при підозрі на гастропарез та пілоростеноз.[5]. Дослідження кишкової кровотечі з міченими еритроцитами або колоїдом технецію-99m дозволяє виявити активну кровотечу при

швидкості не менш як 0,1–0,5 мл/хв.

Сцинтиграфія лейкоцитів, мічених *in vitro* технецієм-99m або індієм-111, застосовується для виявлення вогнищ запалення та інфекції (остеомієліт, абсцеси, запальні захворювання кишечника) [5].

Радіаційна безпека та дозиметрія

Ефективні дози опромінення при сцинтиграфічних дослідженнях суттєво варіюють залежно від типу радіофармпрепарату, введеної активності та протоколу дослідження [1, 6]. Для типових діагностичних досліджень ефективні

дозы становлять: сцинтиграфія кісток – 4-6 мЗв; нефросцинтиграфія – 1-2 мЗв; перфузійна сцинтиграфія міокарда – від 1–3 мЗв (ультрадозові протоколи) до 10–15 мЗв (традиційні протоколи) [6, 8, 13].

Вагітність є відносним протипоказан-

Розділ 1. Природничі науки в медицині
Section 1. Natural sciences in medicine

ням до більшості сцинтиграфічних досліджень, оскільки радіофармпрепарати можуть накопичуватися у плода та збільшувати дозу опромінення. Винятками є ситуації, де користь для матері перевищує потенційний ризик для плода, наприклад, при діагностиці ТЕЛА [6]. У період лактації рекомендується тимчасово припинити грудне вигодовування відповідно до типу застосованого радіофармпрепарату.

Перспективи розвитку

Подальший розвиток сцинтиграфії пов'язаний з впровадженням напівпровідникових CZT-детекторів нового покоління, що забезпечують значно кращу енергетичну та просторову роздільну здатність порівняно з традиційними NaI(Tl)-кристалами [1, 15]. CZT-камери кардіологічного призначення вже продемонстрували скорочення часу дослідження та можливість зниження доз радіофармпрепаратів при збереженні діагностичної якості.

Штучний інтелект та машинне навчання трансформують ядерну медицину на всіх рівнях - від автоматичної сегментації та кількісного аналізу зображень до прогностичних моделей та підтримки клінічних рішень [7, 29]. Нейронні мережі глибокого навчання застосовуються для відновлення зображень низької дози, зменшення шуму та поліпшення просторової роздільної здатності.

Молекулярна візуалізація за допо-

могою таргетних радіофармпрепаратів відкриває нові можливості для ранньої діагностики захворювань на доклінічних стадіях та персоналізованого лікування [6, 7]. Тераноз - концепція, що передбачає використання одного й того самого молекулярного ліганда як у діагностичному, так і в терапевтичному варіанті (наприклад, ФДГ-ПЕТ для виявлення та PSMA-617-лютецій-177 для лікування раку передміхурової залози) - є перспективним напрямком персоналізованої медицини [6, 18, 30].

Розвиток тотальної ПЕТ (Total-Body PET) із надчутливими детекторними кільцями, що охоплюють усе тіло пацієнта, відкриває можливості для кінетичного моделювання, досліджень із мінімальними дозами та надшвидкісної візуалізації [14]. Поєднання мультимодальної ядерної медицини з рідкою біопсією та геномними даними є основою майбутньої прецизійної онкології.

Розвиток тотальної ПЕТ (Total-Body PET) із надчутливими детекторними кільцями, що охоплюють усе тіло пацієнта, відкриває можливості для кінетичного моделювання, досліджень із мінімальними дозами та надшвидкісної візуалізації [14]. Поєднання мультимодальної ядерної медицини з рідкою біопсією та геномними даними є основою майбутньої прецизійної онкології.

Висновки

Сцинтиграфія є потужним методом функціональної діагностики, що базується на фундаментальних принципах ядерної фізики та забезпечує унікальну інформацію про метаболічні процеси, перфузію тканин та функціональний стан органів і систем організму. Від перших сцинтиляційних сканерів 1950-х років метод еволюціонував до складних гібридних систем ОФЕКТ/КТ та ПЕТ/КТ, що поєднують функціональну та анато-

мічну інформацію в єдиному дослідженні.

Розуміння фізичних основ методу, принципів роботи гамма-камер, властивостей радіофармпрепаратів та клінічних показань є необхідним для медичних працівників різних спеціальностей - від кардіологів та онкологів до нефрологів, неврологів та ендокринологів. Вибір методу візуалізації у конкретній клінічній ситуації повинен базуватися на унікальній патофізіологічній ін-

Розділ 1. Природничі науки в медицині
Section 1. Natural sciences in medicine

формації, що надає кожна модальність.

Сцинтиграфія демонструє виняткові діагностичні можливості в певних клінічних ситуаціях: практично 100% специфічність при транстиретиновому амілоїдозі серця, ключова роль у діагностиці нейроендокринних пухлин, незамінність при функціональній оцінці нирок та щитоподібної залози. Водночас метод має обмеження в онкологічних ситуаціях, де переважають ПЕТ/КТ та МРТ у виявленні ранніх змін.

Радіаційна безпека є невід’ємним аспектом ядерної медицини, і сучасні протоколи дозволяють проводити більшість досліджень при ефективних дозах, співставних або нижчих за дози при КТ-ангіографії. Впровадження напівпровідникових детекторів, алгоритмів штучного інтелекту, нових таргетних радіофармпрепаратів та концепції теранозу відкриває нові горизонти персоналізованої медицини та підвищення доступності радіонуклідних методів діагностики.

Конфлікт інтересів

Автори декларують відсутність фінансових або інших конфліктів інтересів, які могли вплинути на результати, інтерпретацію та висновки дослідження.

Внесок авторів

Всі автори зробили значний внесок у підготовку оригінальної та переглянутої версії цієї статті.

Список використаних джерел

1. Cherry SR, Sorenson JA, Phelps ME. Physics in Nuclear Medicine. 4th ed. Philadelphia: Elsevier Saunders; 2012. 523 p. https://training.hepi.tsu.ge/Radet/Books/Physics_NuclMed.pdf
2. Ziessman HA, O'Malley JP, Thrall JH. Nuclear Medicine: The Requisites. 4th ed. Philadelphia: Elsevier; 2014. 608 p. <https://www.elsevier.com/books/nuclear-medicine-the-requisites/ziessman/978-0-323-08299-0>
3. Ell PJ, Gambhir SS. Nuclear Medicine in Clinical Diagnosis and Treatment. 3rd ed. Edinburgh: Churchill Livingstone; 2004. 1896 p. <https://archive.org/details/nuclearmedicinec0000ellp>
4. Bailey DL, Townsend DW, Valk PE, Maisey MN. Positron Emission Tomography: Basic Sciences. London: Springer; 2005. 910 p. <https://link.springer.com/book/10.1007/b138952>
5. Mettler FA Jr, Guiberteau MJ. Essentials of Nuclear Medicine Imaging. 7th ed. Philadelphia: Elsevier; 2019. 544 p. <https://www.elsevier.com/books/essentials-of-nuclear-medicine-imaging/mettler/978-0-323-52470-4>
6. International Atomic Energy Agency. Nuclear Medicine Resources Manual. Vienna: IAEA; 2020. 456 p. <https://www.iaea.org/publications>
7. European Association of Nuclear Medicine. EANM procedural guidelines for PET/CT tumour imaging. Eur J Nucl Med Mol Imaging. 2021;48:1-15. <https://doi.org/10.1007/s00259-020-05209-y>
8. Society of Nuclear Medicine and Molecular Imaging. Procedure Guidelines for Myocardial Perfusion Imaging. J Nucl Med Technol. 2020;48(2):95-104. <https://doi.org/10.2967/jnmt.119.236695>
9. Bombardieri E, Aktolun C, Baum RP, et al. Bone Scintigraphy: Procedure Guidelines for Tumour Imaging. Eur J Nucl Med Mol Imaging. 2003;30:99-106. <https://doi.org/10.1007/s00259-003-1347-2>
10. Basu S, Alavi A. Defining co-related parameters between PET and anatomical imaging. Eur J Nucl Med Mol Imaging. 2008;35:1376-1383. <https://doi.org/10.1007/s00259-008-0773-6>
11. Gillmore JD, Maurer MS, Falk RH, et al. Nonbiopsy Diagnosis of Cardiac Transthyretin Amyloidosis. Circulation. 2016;133(24):2404-2412. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.116.021612>
12. Terpos E, Kleber M, Engelhardt M, et al. European Myeloma Network guidelines for multiple myeloma complications. Haematologica. 2015;100(10):1254-1266. <https://doi.org/10.3324/haematol.2014.117176>
13. Einstein AJ, Johnson LL, Bokhari S, et al. Coronary calcium estimation from CT attenuation scans. J Am Coll Cardiol. 2010;56(23):1914-1921. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2010.05.057>
14. Badawi RD, Shi H, Hu P, et al. First human imaging studies with the EXPLORER total-body PET scanner. J Nucl Med. 2019;60(3):299-303. <https://doi.org/10.2967/jnumed.119.226498>
15. Slomka PJ, Pan T, Berman DS, Germano G. Advances in SPECT and PET hardware. Prog Cardiovasc Dis. 2015;57(6):566-578. <https://doi.org/10.1016/j.pcad.2015.02.002>

Розділ 1. Природничі науки в медицині
Section 1. Natural sciences in medicine

16. Haugen BR, Alexander EK, Bible KC, et al. American Thyroid Association guidelines for thyroid cancer. *Thyroid*. 2016;26(1):1-133. Available from: <https://doi.org/10.1089/thy.2015.0020>
17. Krenning EP, Kwekkeboom DJ, Bakker WH, et al. Somatostatin receptor scintigraphy. *Eur J Nucl Med*. 1993;20(8):716-731. <https://doi.org/10.1007/BF00181765>
18. Sartor O, de Bono J, Chi KN, et al. Lutetium-177-PSMA-617 therapy. *N Engl J Med*. 2021;385:1091-1103. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2107322>
19. Fiechter M, Gebhard C, Fuchs TA, et al. CZT myocardial perfusion imaging. *J Nucl Med*. 2013;54(7):1142-1147. <https://doi.org/10.2967/jnumed.112.116921>
20. Wahl RL, Jacene H, Kasamon Y, Lodge MA. From RECIST to PERCIST. *J Nucl Med*. 2009;50 Suppl 1:122S-150S. <https://doi.org/10.2967/jnumed.108.057307>
21. Zamagni E, Nanni C, Dozza L, et al. FDG-PET/CT in multiple myeloma. *J Clin Oncol*. 2021;39(2):116-125. <https://doi.org/10.1200/JCO.20.00386>
22. Lyman GH, Giuliano AE, Somerfield MR, et al. Sentinel lymph node biopsy guidelines. *J Clin Oncol*. 2005;23(30):7703-7720. <https://doi.org/10.1200/JCO.2005.08.001>
23. Kwekkeboom DJ, de Herder WW, Kam BL, et al. Radiolabeled somatostatin therapy. *J Clin Oncol*. 2008;26(13):2124-2130. <https://doi.org/10.1200/JCO.2007.15.2553>
24. Ruda JM, Hollenbeak CS, Stack BC Jr. Primary hyperparathyroidism review. *Otolaryngol Head Neck Surg*. 2005;132(3):359-372. <https://doi.org/10.1016/j.otohns.2004.10.005>
25. Gordon I, Piepsz A, Sixt R. Renogram guidelines. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2011;38(6):1175-1188. <https://doi.org/10.1007/s00259-011-1811-3>
26. Bajc M, Schümichen C, Grüning T, et al. V/Q SPECT guideline. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2019;46(12):2429-2451. <https://doi.org/10.1007/s00259-019-04450-0>
27. Djang DS, Janssen MJ, Bohnen N, et al. Dopamine transporter imaging guideline. *J Nucl Med*. 2012;53(1):154-163. <https://doi.org/10.2967/jnumed.111.100784>
28. Johnson KA, Minoshima S, Bohnen NI, et al. Amyloid PET criteria. *Alzheimers Dement*. 2013;9(1):e1-e16. <https://doi.org/10.1016/j.jalz.2013.01.002>
29. Litjens G, Kooi T, Bejnordi BE, et al. Deep learning in medical imaging. *Med Image Anal*. 2017;42:60-88. <https://doi.org/10.1016/j.media.2017.07.005>
30. Herrmann K, Schwaiger M, Lewis JS, et al. Radiotheranostics roadmap. *Lancet Oncol*. 2020;21(3):e146-e156. [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(19\)30821-6](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(19)30821-6)