

Досвід двадцятирічного застосування ОФЕКТ/КТ в ядерній медицині (огляд літератури)

П.О. Король^{1, 2},
М.М. Ткаченко¹, О.В. Щербіна³

Національний медичний університет імені О.О. Богомольця¹, Київ, Україна
Київська міська клінічна лікарня № 12², м. Київ, Україна
Національна медична академія післядипломної освіти імені П.Л. Шупика³, м. Київ, Україна

Вступ

Комплексна позитронно-емісійна томографія (ПЕТ), що комбінована з комп'ютерною томографією (КТ), а саме ПЕТ/КТ, викликала великі сподівання та очікування у спільноті медичної візуалізації [10]. Передбачалось, що з появою на ринку широкого спектру позитрон-випромінюючих радіофармацевтичних препаратів (РФП), вони практично замінять усі однофотонні випромінюючі речовини. Проте, десять років потому цей прогноз не виправдався, і ми спостерігаємо епоху відновленого інтересу до однофотонних зображень. Тривала еволюція технологій візуалізації в ядерній медицині та досвід у цій галузі демонструє повний синергізм між однофотонною та позитронною візуалізацією [77], продовжуючи, таким чином, дискусію щодо оптимальної стратегії управління широким спектром клінічно важливої інформації [148]. Гібридна візуалізація, що включає застосування однофотонної комп'ютерної томографії (ОФЕКТ) у поєднанні з КТ, транслює молекулярну та метаболічну інформацію безпосередньо на клінічний вплив широкого спектру захворювань. Сцинтиграфія характеризується високою чутливістю і негативним значенням прогнозування (NPV), що посилюється за рахунок ОФЕКТ.

В той же час, ОФЕКТ/КТ додатково покращує показники діагностичної точності, специфічності та позитивної прогностичної цінності (ППЦ) досліджень ядерної медицини. Застосування ОФЕКТ/КТ розповсюджується у світі із зростаючою частотою і поширюється на нові клінічні умови. Останні тенденції при продажу нового обладнання для ядерної медицини – підтвердити, що установки пристроїв

ОФЕКТ/КТ демонструють високий попит у всьому світі [64].

Значення ОФЕКТ/КТ для стадіювання, планування лікування та моніторингу для найрізноманітніших захворювань було переглянуто, коли ОФЕКТ/КТ знаходився у початковій фазі впровадження у діагностично-клінічний процес [4]. За останнє десятиліття відбувся значний прогрес у технологічних аспектах ОФЕКТ. Було визнано доцільним здійснення огляду сучасних застосувань ОФЕКТ/КТ, не тільки з позицій діагностичного інструменту, а також інтегрування даної модальності в клінічний процес. З цією метою вирішуються складні технологічні питання залучення до використання ОФЕКТ/КТ нових радіофармацевтичних засобів, підвищення якості протоколів отримання діагностичних зображень, кількісної оцінки, а також складання протоколів дозиметрії та радіаційного опромінення, що виходять за межі поточного огляду.

Метод ОФЕКТ/КТ в онкології.

Метод ОФЕКТ/КТ знайшов шлях до більшості клінічних сценаріїв у пацієнтів зі злоякісними новоутвореннями, які здійснюються за допомогою однофотонних випромінювачів. Наявність як функціональних, так і структурних даних призвело до доведеного синергетичного впливу на діагностичний потенціал при оцінці злоякісних пухлин. Сучасні пристрої ОФЕКТ/КТ оснащені компонентом КТ з широкими діагностичними можливостями. Це забезпечує значний потенціал для підвищення значення цієї модальності в контексті оцінки пухлин шляхом проведення контрастно-посиленої КТ в рамках гібридного дослідження. Незважаючи на те, що в даний час контрастне посилення не проводиться в звичайному режимі або навіть не рекомендується для ОФЕКТ/

КТ, даний аспект потребує подальшого розгляду на базі надійних доказів, накопичених для ПЕТ/КТ візуалізації. Поточні клінічні застосування ОФЕКТ/КТ при злоякісних пухлинах мають бути переглянутими, маючи на увазі, що альтернатива у вигляді ПЕТ/КТ є доступною у багатьох діагностичних центрах, з метою подальшого вибору для пацієнта найбільш діагностично ефективної модальності.

Застосування ОФЕКТ при картографії сторожових лімфатичних вузлів.

Виявлення уражених онкологічним процесом лімфатичних метастазів має важливе значення при постановці діагнозу, прогнозуванні та лікуванні різних форм злоякісних новоутворень.

Після інтерстиціальної ін'єкції радіоколоїду в місці первинної пухлини сцинтиграфія візуалізує шляхи її лімфатичного дренажу. Для опису використовується термін «сторожовий лімфатичний вузол» (SLN), тобто перший лімфатичний вузол (ЛВ), з яким стикаються лімфатичні судини, які дренують первинну пухлину. Лімфатичний дренаж складний і ОФЕКТ/КТ дозволяє здійснити точне доопераційне картування SLN з подальшою реалізацією в персоналізованому хірургічному підході [74].

При злоякісній пухлині молочної залози та меланомах радіонуклідне картування SLN добре вивчено та широко описано в наукових літературних джерелах (рис. 1). При ракових захворюваннях голови та шиї на ранніх ста-

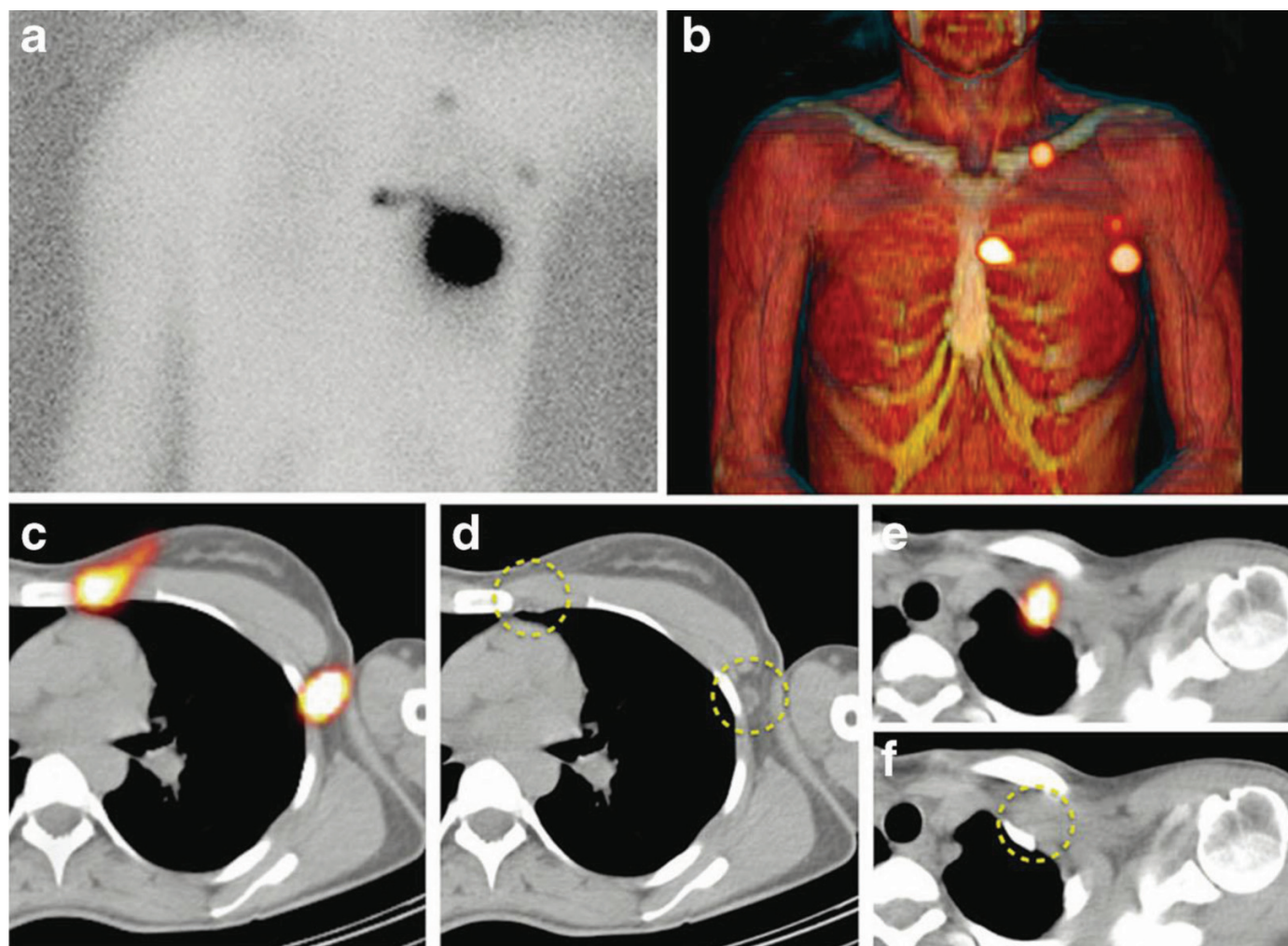


Рис. 1. Лімфосцинтиграфія та ОФЕКТ/КТ з ^{99m}Tc –нанокolloїдом. Передопераційне картографування «сторожового» лімфатичного вузла у 63-річної жінки, хворої на рак лівої молочної залози після внутрішньопухлинної ін'єкції ^{99m}Tc –нанокolloїдного альбуміну. [Radioguided surgery for breast cancer. In: Strauss HW, Mariani G, Volterrani D, Larson SM, Eds. Nuclear Oncology – From Pathophysiology to Clinical Applications. New York: Springer; 2017:1363–1400].

діях, біопсія SLN все частіше застосовується для стратифікації лікування, що призводить до зниження захворюваності та кращим результатам, порівняно з виборчим розсіченням ший [123].

При гінекологічних ракових захворюваннях радіонуклідне картування SLN за допомогою ОФЕКТ/КТ покращує результати внутрішньоопераційної біопсії SLN при раку шийки матки та вульви [131]. За допомогою ОФЕКТ/КТ анатомічно точно було виявлено SLN у 91 % хворих на пухлини ендометрію з низьким ступенем поширеності вузлових метастазів [119]. Одне перспективне дослідження продемонструвало діагностичну цінність ОФЕКТ/КТ візуалізації при раку статевого члена, що покращує швидкість виявлення ЛВ та їх точну локалізацію в дренажних басейнах [50].

ОФЕКТ при пухлинах щитовидної залози.

Диференційований відбір хворих для післяопераційної радіоїодної абляції (РА) хворих на диференційований рак щитовидної залози (ДРЩЗ) є основним фактором клінічної та гістопатологічної стратифікації ризику [11]. Сцинтиграфія всього тіла (WBS) хворих на ДРЩЗ, після завершення абляції, може змінити стратифікацію ризику. ОФЕКТ/КТ надає додаткову інформацію, в основному, за рахунок оптимізації діагностичної візуалізації у двовимірному площинному зображенні [14]. РА-ОФЕКТ/КТ має порівнюватися з РА-WBS на різних стадіях ДРЩЗ, включаючи доабляційний та післярадіоабляційний період, а також після терапії рецидивуючої або метастатичної хвороби. В дорадіоабляційний період за допомогою РА-ОФЕКТ/КТ виявлено регіонарні шийні вузлові метастази в 30-44 % випадків, віддалені метастази – в 4-10%, що призводить до зміни в управлінні терапевтичною тактикою у 30-60 % пацієнтів, які в подальшому отримуватимуть більш високі активності радіоактивного йоду при РА, ніж планувалось раніше [68]. Після радіоабляції ОФЕКТ/КТ був значно більш специфічним, ніж WBS у комплексі з ОФЕКТ або без неї, що мало певне додаткове діагностичне значення в 42 % випадків [98]. В деяких діагностичних дослідженнях за участю великої кількості пацієнтів за допомогою ОФЕКТ/КТ було точно візуалізовано понад 90 % радіоаблятивних вогнищ, що мічені на WBS, та в подальшому було виявлено метастази в регіонарні шийні ЛВ або віддалені ме-

тастази в 9-40 % випадків. Зміна стадії TNM в середньому відбулась у 10 % хворих, категорія ризику складала 35 % та планове управління терапевтичним процесом здійснено у 15 % пацієнтів [20, 151]. Постабляційна РА-ОФЕКТ/КТ візуалізація також широко застосовується для оцінки радіаційної дозиметрії [124]. Після здійснення РА пацієнтів на рецидивуючий або метастатичний ДРЩЗ, ОФЕКТ/КТ візуалізація надала важливу інформацію у 73,9 % випадків, що призвело до зміни управління терапевтичною тактикою у 47,1 % пацієнтів [145]. За допомогою ОФЕКТ/КТ було виявлено вузлові метастази в регіонарні ЛВ ший в 83,1 % випадків, легеневі метастази у 15,5 % та метастази в кістки скелету у 2,8 % пацієнтів [128]. Попередня обробка результатів ПЕТ/КТ з ^{124}I та післятерапевтична ОФЕКТ/КТ були узгоджені у 97 % уражень [65]. Порівняння даних діагностичної інформативності методу ПЕТ/КТ з 18F-фтордезоксиглюкоза (ФДГ), післяаблятивної РА-ОФЕКТ/КТ та планарної сцинтиграфії показали, що параметри діагностичної інформативності ОФЕКТ/КТ були вищими, ніж показники планарної сцинтиграфії або 18F-ФДГ ПЕТ/КТ. У післяаблятивних пацієнтів параметри діагностичної інформативності методу ОФЕКТ/КТ були вищими, ніж планарної сцинтиграфії, але нижчими, ніж 18F-ФДГ ПЕТ/КТ. Методика ОФЕКТ/КТ мала високе діагностичне значення, в середньому, у 57 % пацієнтів з ДРЩЗ. За допомогою ОФЕКТ/КТ було визначено наявність регіонарних метастазів в ЛВ або віддалених метастазів приблизно у 25 % пацієнтів. Таким чином, було змінено стадію злоякісного процесу більше ніж у 20 % пацієнтів, що призводило до зміни планового управління терапевтичною тактикою приблизно в 25 % випадків [152].

Застосування ОФЕКТ/КТ при нейроендокринних новоутвореннях.

Нейроендокринні новоутворення (НЕН) є неоднорідною групою пухлин, що походять з одиночних або кластеризованих нейроендокринних клітин, які розташовані у шлунково-кишковому тракті (ШКТ) та легенях, рідше в тимусі, надниркових залозах та гіпофізі, парашитовидній та щитовидній залозі. Методи променевої візуалізації відіграють значну роль у діагностиці, стадіюванні, виборі лікування та терапевтичному супроводженні пацієнтів на НЕП. Зокрема, сцинтиграфія з аналогами со-

матостатинових рецепторів (ССР) має на меті визначення функціонально активних НЕП.

Рентгено-маркована октреотидна скinti-графія ефективно застосовується для оцінки ССР-позитивних НЕП [106, 140]. В останні роки набуває актуальності здійснення ПЕТ/КТ з маркуванням 68-Ga аналогами ССГ. Катеxоламіний обмін оцінювався за допомогою ^{123}I -метайодобензилгуанідину (mIBG), 18F-ДОФА та, потенційно, за допомогою [11C] 5-гідрокситриптофану (5-НТР). В той час, як застосування ПЕТ/КТ пов'язане з вищою діагностикою точністю, більш комфортними для пацієнта умовами діагностичного процесу та нижчим рівнем радіаційного опромінення, використання ОФЕКТ/КТ також має доведені статистично вірогідні показники діагностичної інформативності в оцінці НЕП.

ОФЕКТ/КТ у виявленні кісткових метастазів.

Пацієнти з метастазами раку у кістки скелету мають сумнівний прогноз та низький рівень виживаності [48, 52]. Остеосцинтиграфія (ОСГ) виявляє метастази за наявності реактивного кісткового утворення. КТ візуалізує кісткові метастази, як різницю в щільності відносно інтактної тканини. Чутливість планарної ОСГ та ОФЕКТ методу становить 85 % і 96 %, відповідно [28, 48, 81], що обмежена просторовим дозволом планарних та ОФЕКТ томографів [5]. Слід зазначити, що ОСГ не виявляє малих кісткових метастазів, які не мають високого поглинання РФП, наприклад, раку передміхурової залози. Виключно літичні метастази, такі як, рак нирок або лімфома та, переважно, літичні пухлинні ураження (рак молочної залози), також важко виявити за допомогою ОСГ. Ці пошкодження можна виявити за допомогою КТ-складової ОФЕКТ/КТ, яка посилює чутливість даного дослідження. Метастази у кістки скелету пацієнтів на НЕП також ефективно виявляються шляхом застосування ФДГ- ПЕТ/КТ, яка відіграє важливу роль в оцінці участі скелета в злоякісному пухлинному процесі, особливо у випадку ураження з переважно остеолітичним малюнком [52]. Специфічність планарної ОСГ для визначення кісткових метастазів низька, оскільки множинні доброякісні процеси показують посилене поглинання радіоіндикаторів, що вимагає проведення диференціального діагнозу [71, 150]. Однак, оскільки більшість добро-

якісних уражень мають типовий вигляд на КТ, об'єднана інформація, що надається шляхом ОФЕКТ/КТ, додає специфічності ОСГ в оцінці уражень скелету при злоякісних пухлинах [46, 75, 90]. Незважаючи на неоднорідність даних діагностичної інформативності, результати досліджень надзвичайно послідовні. За даними літератури чутливість методу ОФЕКТ/КТ у виявленні кісткових метастазів дорівнює 66,7-100 % [75, 90]. Специфічність ОФЕКТ/КТ у виявленні скелетних метастазів нижча по відношенню до методів МРТ та ФДГ- ПЕТ/КТ [37, 75]. Нова перспектива для візуалізації кісткової системи є ОФЕКТ/КТ всього тіла, що продемонструвала більш високу чутливість та специфічність по відношенню до ОСГ та, напевне, є пріоритетним методом візуалізації у даних хворих [67, 149].

ОФЕКТ/КТ при пухлинах передміхурової залози.

На сучасному етапі розробка та впровадження простат-специфічного мембранного антигену (ПСА) зробили революцію в діагностиці та лікуванні раку передміхурової залози (РПЗ) [56, 91]. Нещодавно було впроваджено в клінічну практику ПСА-ліганди з маркуванням $^{99\text{m}}\text{Tc}$ [137]. Наприклад, за допомогою $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MIP 1404 ОФЕКТ/КТ (підтип ПСА) можливе ефективне виявлення метастатичного процесу РПЗ (рис. 2).

Чутливість методики ОФЕКТ/КТ досягає 97 % для діагностики первинного РПЗ [87, 112]. За даними літературних джерел, у групі з 225 пацієнтів на біохімічний рецидив РПЗ показник виявлення злоякісного процесу співвідносився з рівнем простат-специфічного антигену (ПСА) [138]. ПСА-ОФЕКТ/КТ також продемонстрував більш високу чутливість, ніж метод ОСГ, ОФЕКТ/КТ та МРТ в контексті виявлення скелетних метастазів у пацієнтів на біохімічний рецидив РПЗ [51]. Порівняльне дослідження в когорті з 14 пацієнтів показало перевагу 68Ga-ПСА-ПЕТ/КТ над $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -HYNIC, а також ПСА-ОФЕКТ/КТ для виявлення метастазів РПЗ [36].

Трансартеріальна радіоемболізація печінки.

Трансартеріальна радіоемболізація (ТАРЕ) представляє собою черезшкірний внутрішньо-артеріальний діагностичний метод для введення емболічних частинок ^{166}Ho -мікросфер розміром до кількох мікронів з метою лікування

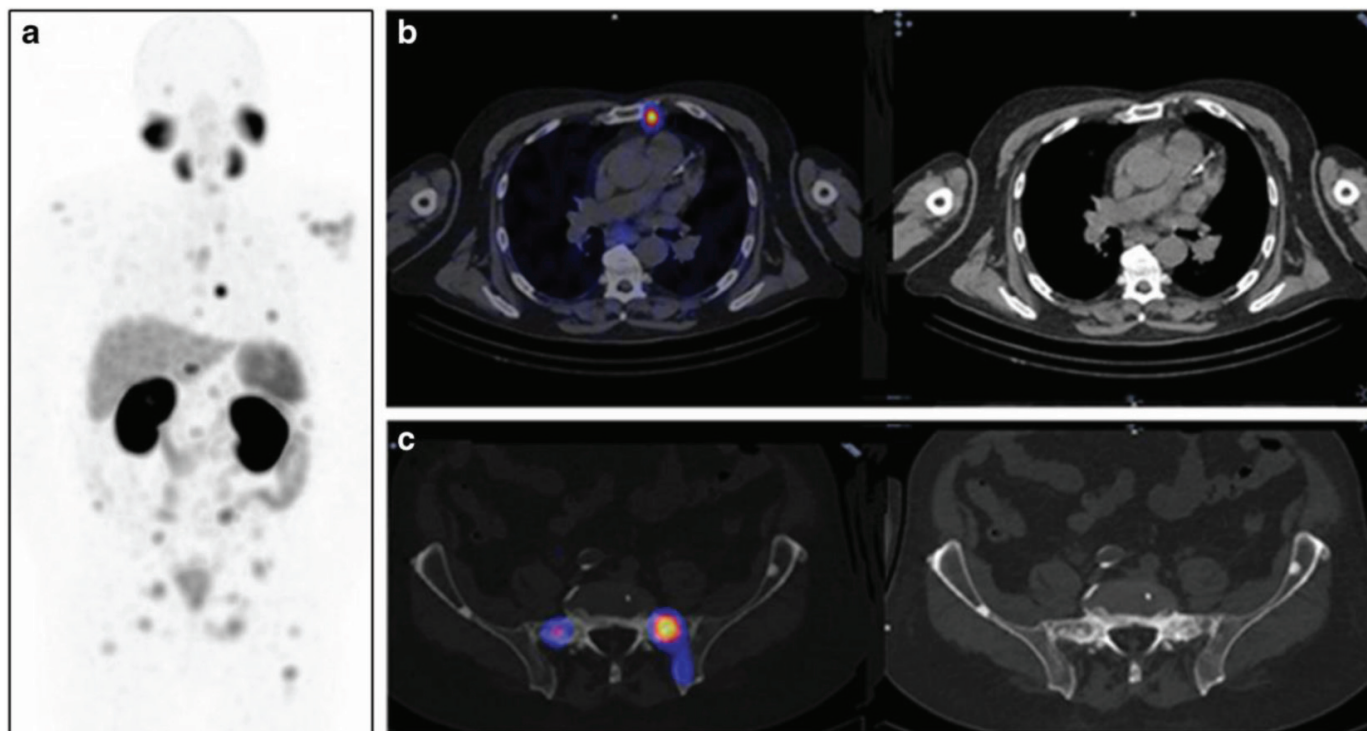


Рис. 2. ПСМА-ОФЕКТ/КТ з ^{99m}Tc -MIP-1404 у пацієнта С., 81 р., із злоякісною пухлиною передміхурової залози (pT4, N2, M0, G3) з біохімічним рецидивом, діапазон рівня ПСА у сироватці крові (6,59 – 17,34 нг/мл) протягом трьохмісячного часового інтервалу. Візуалізовано множинні MIP-1404-авідні остеобластні ураження кісток, що відповідають функціонально активним та неактивним скелетним метастазам [C. Schmidkonz, M. Cordes, M. Beck [et al.] // Clin Nucl Med. – 2018. – Vol. 43. – P. 225–231].

злоякісних уражень печінки. Бета-опромінення сприяє руйнуванню пухлинних клітин, що оточують мікросудини з високою концентрацією радіоактивних частинок. Постачання крові до пухлин печінки відбувається головним чином за рахунок артеріального кровообігу, а отже, доставка радіоактивних сполук може бути досягнута за рахунок високоселективного пухлинного поглинання РФП в печінковій артерії. Ангіографічна оцінка в поєднанні зі скінтиграфією після внутрішньоартеріальної ін'єкції альбуміну ^{99m}Tc з макроагрегатним альбуміном відображає наявність судин, що живлять пухлину, кількісно визначає потенційне шунтування печінки та може виявляти стравохідний рефлюкс. Передтерапевтична ОФЕКТ/КТ візуалізація може краще оцінити розподіл радіоіндикатору на внутрішньо- та позапечінкові складові та може бути використана як доповнення до розрахунку терапевтичної дози. Після введення мікросфер ^{90}Y післятерапевтична ОФЕКТ/КТ може перевірити розподіл

сфери та дозволити виконання дозиметрії після лікування.

ОФЕКТ/КТ при доброякісних ураженнях скелету.

ОФЕКТ/КТ-візуалізація з ^{99m}Tc -метилендіфосфонатом (МДФ) відіграє ключову роль в оцінці патології опорно-рухового апарату, в тому числі у пацієнтів з хронічним болевим синдромом або з непереконаливими результатами зображень аксіальних зрізів КТ, що забезпечує функціональну та локалізаційну інформацію [16]. ОФЕКТ/КТ підвищує точність ОСГ візуалізації при травмах та ревматичних захворюваннях, таких як окультні переломи, запальний артрит та спондилоартропатії (рис. 3) [42, 97].

У пацієнтів із хронічними болями в поперековій ділянці хребта ОФЕКТ/КТ використовується для направленої цілеспрямованої терапії [47, 60, 132,] та оцінки ускладнень після операцій на хребті [6, 17, 102, 103,]. У пацієнтів з рецидивуючим болем після проведення по-

перекового артродезу ОФЕКТ/КТ виявив високу чутливість та специфічність для виключення гвинтового ослаблення [6]. Діагностика больового синдрому в кістках кисті і зап'ястьях шляхом ОСГ є складною через розгалужену регіональну анатомію. ОФЕКТ/КТ візуалізація дозволяє виявити посттравматичне ремоделювання кісток при окультних переломах, які зазвичай не діагностують за допомогою інших методів візуалізації [78, 142]. Для візуалізації, наприклад, скафолунатної зв'язки або трикутного комплексу фібро-хрящів, успішно використовується артрографія, ОФЕКТ/КТ [34]. У пацієнтів з картиною неспецифічного регіонального болю ОФЕКТ/КТ візуалізація показала більш високий показник чутливості, ніж метод рентгенографії та планарної ОСГ [2, 110], а також більш високу специфічність, ніж МРТ [64]. Виявлення джерела болю після ендопротезування стегнового або колінного суглоба не є простим [135]. Рентгенологічний

метод – це початковий тест, за яким слід проводити ОСГ з метою підтвердження або виключення септичного або асептичного ураження [1, 45, 86]. Незважаючи на те, що метод ОСГ перешкоджає неспецифічному поглинанню радіоіндикаторів, компонент КТ методу ОФЕКТ/КТ може визначити причинні фактори больового синдрому, такі як остеоліз, перелом, кальцифікацію тощо. ОФЕКТ/КТ продемонстрував більш високу діагностичну точність при оцінці асептичного та септичного ураження стегнового та колінного ендопротезів, порівняно з трифазною ОСГ та ОФЕКТ [13, 84, 94]. Метод ОФЕКТ/КТ був успішно застосований для оцінки життєздатності кісток після артропластики з послідовним порівнянням з МРТ. Обидві методики були взаємодоповнюючими в диференціальній діагностиці між життєздатною та нежиттєздатною тканиною [49]. У пацієнтів після ендопротезування колінного суглобу ОФЕКТ/КТ визначив типові закономір-

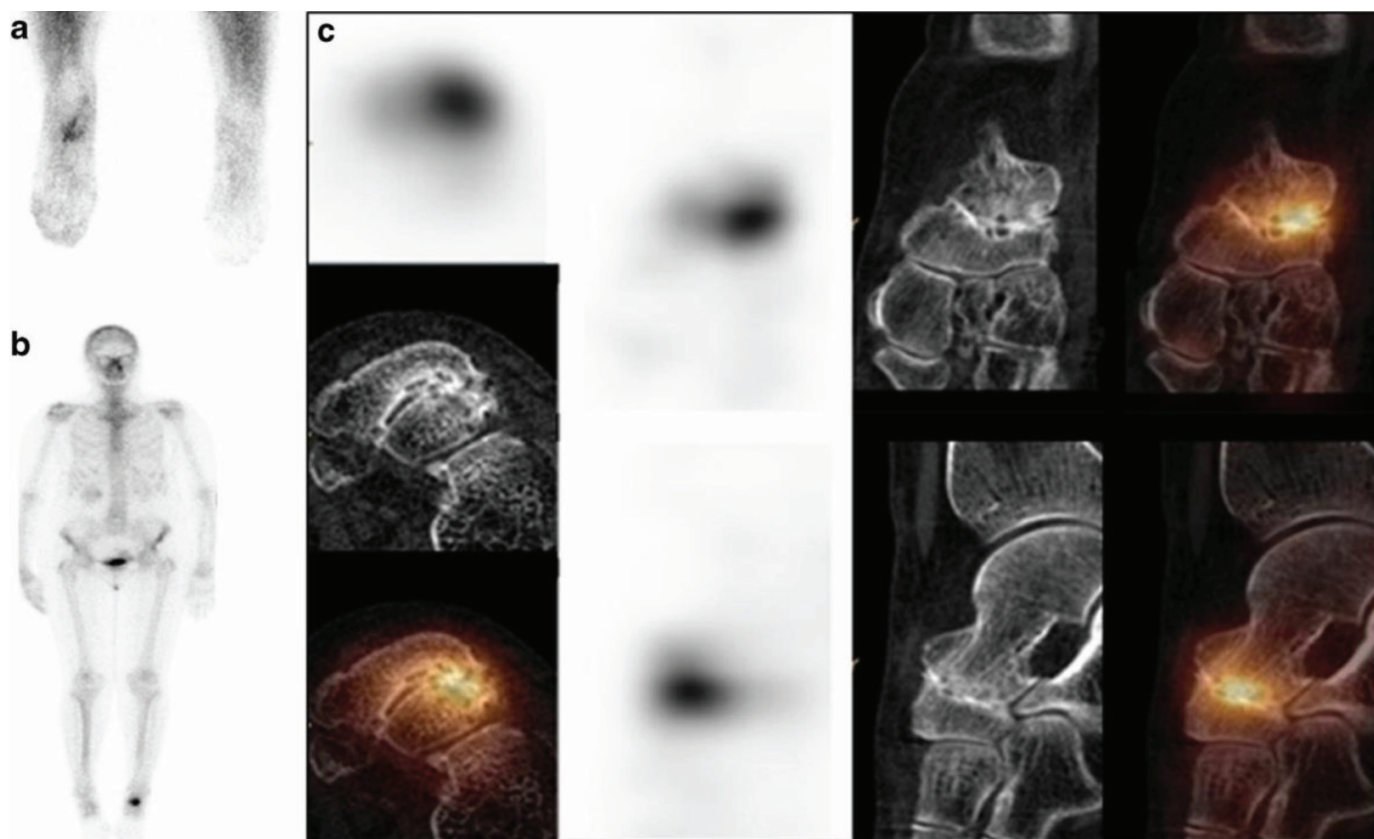


Рис. 3. ОФЕКТ/КТ з $^{99m}\text{Tc-MDP}$ у пацієнта К., 70 р., з дегенеративно-дистрофічним ураженням лівої стопи. На ранньому та відсроченому планарних сканах, а також на ОФЕКТ/КТ знімках візуалізовано вогнище гіперфіксації РФП в лівому талонавікулярному суглобі [I. Lee, H. Budiawan, J. Y. Moon *et al.*] // *J Korean Med Sci.* – 2014. – Vol. 29. – P. 1711–1716].

ності пателлафеморальних порушень, надалі покращуючи управління терапевтичним процесом [66, 115]. Після реконструкції передньої хрестоподібної зв'язки за допомогою ОФЕКТ/КТ здійснено оцінку кісткового ремоделювання, інкорпорацію трансплантата або його недостатність [100, 107].

Метод ОФЕКТ/КТ успішно застосовується для діагностики переломів, інфекційних уражень, псевдоартрозу, патології сесаміодних кісточок, остеохондрозу [105]. ОФЕКТ/КТ та МРТ ефективно здійснюють порівняльну діагностичну оцінку при больовому синдромі в проекції голенистої і стоп [27]. Метод ОФЕКТ/КТ кісток стоп має діагностичне значення для оцінки патології м'яких тканин у цієї ділянки [88].

Застосування ОФЕКТ/КТ при інфекційних та запальних процесах.

З метою радіонуклідної візуалізації інфекційних та запальних патологічних процесів набувають широкого застосування РП, що мічені радіонуклідами ^{99m}Tc -гексаметилпропіленоаміноксиму (НМРАО) або ^{111}In -оксину, які випромінюють фотон та містять аутологічні лейкоцити (WBC) [44, 53]. В деяких клінічних сценаріях, наприклад, при остеомієлітах (ОМ) хребта або грудни використовують ^{67}Ga -цитрат [108]. Метод ОФЕКТ/КТ дозволяє здійснення ранньої діагностики інфекційної патології, також і визначення точної локалізації процесу. Незважаючи на те, що нещодавно відбувся перегляд концепції променевої візуалізації інфекційної патології на користь застосування $^{18\text{F}}$ ФДГ-ПЕТ/КТ [41], метод ОФЕКТ/КТ є ефективною альтернативою. ОФЕКТ/КТ оптимізує встановлення діагнозу клінічно підозрюваних інфекційних та запальних процесів кісткової системи та визначення локалізації діагностованої патології. Це має діагностичне значення у випадках диференціальної діагностики патології кісткової системи при наявності інфекційної патології м'яких тканин. Згідно даним літературних джерел, що включають змішану сукупність пацієнтів, метод ОФЕКТ/КТ та WBC з міченими ^{111}In -, ^{99m}Tc - або ^{67}Ga -цитратом мали високі показники діагностичної інформативності у третини клінічних випадків [144]. ОМ слід враховувати у хворих на цукровий діабет, що мають в анамнезі хронічні незагоюючі рани, головним чином

на стопах. Дослідження показали, що ОСГ всього тіла підтверджує наявність інфекційного процесу, але ОФЕКТ/КТ має можливість діагностувати або виключати ОМ в кісткових структурах, що межують з м'якими тканинами, уражених інфекційним процесом, пацієнтів з діабетичною стопою [25, 33, 147]. Метод ОФЕКТ/КТ та МРТ має більшу чутливість ніж $^{18\text{F}}$ ФДГ-ПЕТ/КТ візуалізація [25, 33] при оцінці діабетичної стопи, але нижчу специфічність, особливо у пацієнтів після застосування антибіотикотерапії [12, 61]. ОФЕКТ/КТ з ^{67}Ga -цитратом демонструє високу діагностичну точність для спондилітиситу, подібну до показника специфічності МРТ [3], але поступається параметру специфічності $^{18\text{F}}$ ФДГ-ПЕТ/КТ [116]. Метод ОФЕКТ/КТ з ^{111}In -діетиленетріамінпентаацетовою кислотою (ДТПА) також широко використовується для диференціальної діагностики інфекційної патології хребта та оцінки терапевтичної відповіді у хворих після лікування [22]. Застосування методу ОФЕКТ/КТ набуло актуальності в диференціальній діагностиці інфекційних вогнищ щелепи та інших кісток черепа [31, 143]. Двоізотопна ОФЕКТ/КТ з ^{99m}Tc -МДФ та ^{111}In -охіне має високу діагностичну роль для оцінки інфекційної патології кісток тазу [127]. Слід зазначити, що інфекційне ураження м'яких тканин має неспецифічні клінічні ознаки та потребує обширної діагностичної обробки [108]. В зазначених умовах метод ОФЕКТ/КТ може бути корисним при інфекційній патології судинних трансплантатів [108, 139], інфекційному ендокардиті [8, 23], інфекціях серцевих імплантованих електронних пристроїв [72, 93] та лихоманці невідомого генезу [69, 108, 125].

ОФЕКТ/КТ при хворобах паразитовидної залози.

ОФЕКТ з ^{99m}Tc -сестамібі (МІВІ) активно використовується в диференціальній діагностиці пацієнтів на гіперпаратиреоз (ГПТ). Також набули діагностичного значення клінічні протоколи ОФЕКТ/КТ візуалізації на основі ^{99m}Tc -пертехнетата або ^{123}I -йодиду [39, 40]. Впровадження малоінвазивної хірургії у хворих на паратиреоїдну аденому (ПА) підкреслює потребу в точності отримання функціональної та топографічної діагностичної інформації, що надається за допомогою методу ОФЕКТ/КТ (рис. 4).

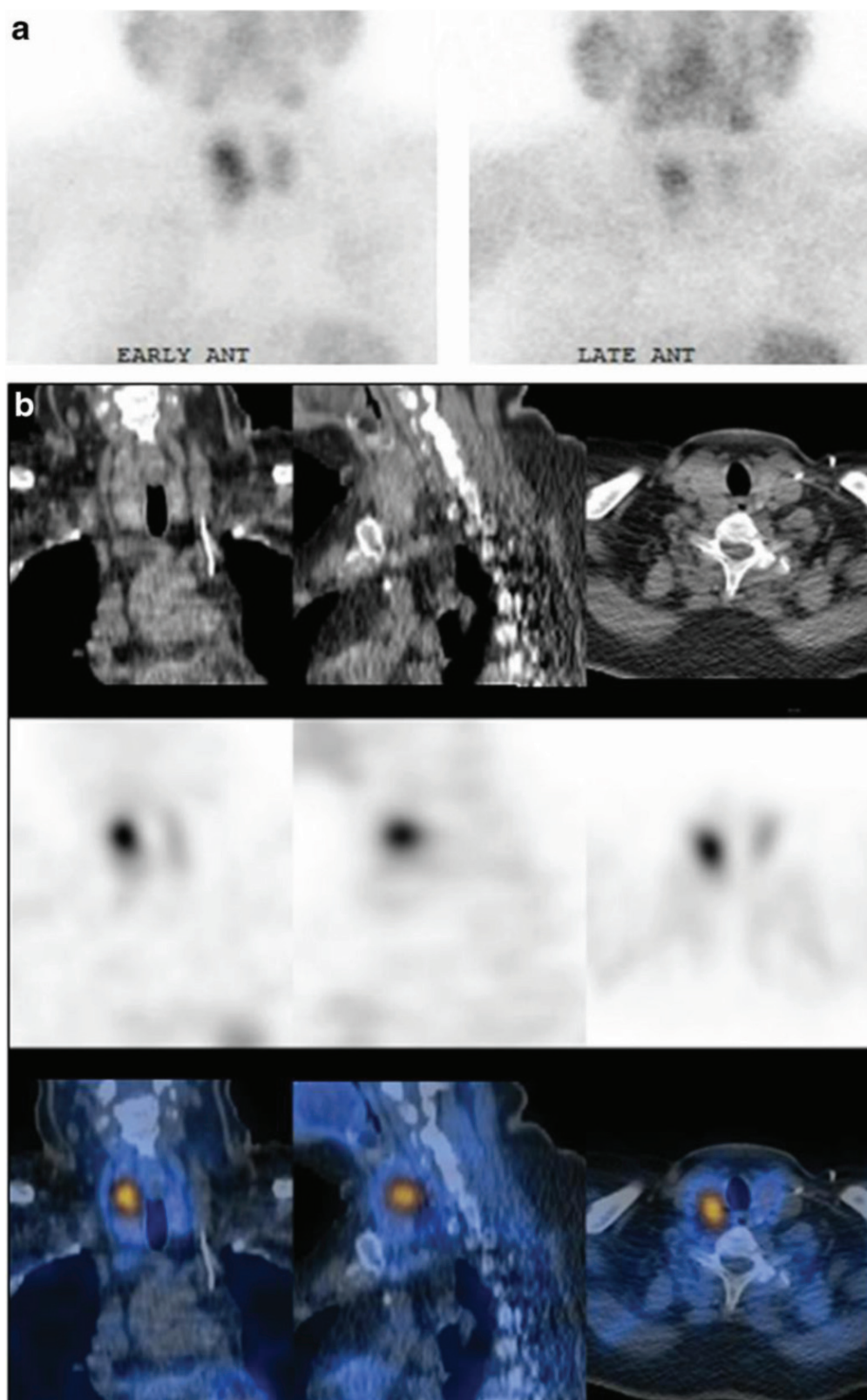


Рис. 4. ОФЕКТ/КТ з ^{99m}Tc -Sestamibi пацієнтки В., 57 р., хворої на аденому паращитовидної залози. На ранньому сцинтиграфічному зображенні (а) візуалізується ділянка гіперфіксації РФП у верхньому полюсі правої частки щитовидної залози (ліворуч). На відсроченому сцинтиграфічному зображенні (праворуч) – вимивання залишку РФП з сусідніх тканин щитовидної залози. При ОФЕКТ/КТ візуалізації (b) – вогнище гіперфіксації діаметром 16 мм, що відповідає аденомі паращитовидної залози [24].

Показник частоти виявлення ПТА за допомогою ОФЕКТ/КТ коливається в межах від 90 % до 96 % [21, 24], що має діагностичну цінність, особливо для патологічних вогнищ невеликих розмірів діаметром 10 мм [113]. Результати ОФЕКТ/КТ з ^{99m}Tc -MIBI співвідносились з показниками паратиреоїдного гормону (ПТГ) та рівнем кальцію сироватки [7, 40]. ОФЕКТ/КТ підвищив діагностичну інформативність виявлення ПТА у 8-39 % пацієнтів [117, 133]. Метод ОФЕКТ/КТ мав діапазон чутливості в межах 83-97 %, специфічності – 89-96 % [39, 113, 117]. Отримані результати ОФЕКТ/КТ з ^{99m}Tc -MIBI призвели до зміни об'єму оперативного втручання у 50 % пацієнтів [21]. Метод ОФЕКТ/КТ є ефективним діагностичним критерієм визначення необхідності здійснення пацієнту оперативного втручання [89], особливо за наявності захворювань щитовидної залози, таких, наприклад, як багатовузловий зоб. Показники діагностичної інформативності ОФЕКТ/КТ з ^{99m}Tc -MIBI в контексті виявлення локалізації ПТА було узгоджено з даними ОФЕКТ та ультразвукового дослідження [26, 121]. У випадках, стійких до медикаментозного лікування, пацієнти на вторинний ПРТ направлялись на паратиреоїдектомію, а передопераційне виконання ОФЕКТ з ^{99m}Tc -MIBI сприяло суттєвій оптимізації хірургічного втручання [120].

ОФЕКТ/КТ при легеневій патології.

Вентиляційна та перфузійна (V/Q) радіонуклідна візуалізація успішно застосовується в диференціальній діагностиці пацієнтів із підозрою на легеневу емболію (ЛЕ) [19]. КТ-легенева ангіографія (КТЛА) у пацієнтів на ЛЕ поступово замінена V/Q скануванням, що є легкодоступним методом та має високий рівень чутливості та специфічності. Слід також зауважити, що застосування КТЛА є обмеженою у зв'язку з виникненням технічних артефактів, різноманітних алергічних реакцій та пригніченням функції нирок [130]. V/Q ОФЕКТ має більш високу чутливість порівняно з планарною сцинтиграфією, але нижчу специфічність, ніж КТЛА [54]. V/Q ОФЕКТ/КТ у порівнянні з методом КТЛА, зазвичай, здійснюється в комплексі з низькодозовою КТ з метою виявлення анатомічної локалізації та здійснення корекції ослаблення [104]. Додавання КТ компонента підвищує специ-

фічність дослідження [109]. Таким чином, при порівнянні показників діагностичної інформативності методів V/Q ОФЕКТ, ОФЕКТ/КТ, перфузійної ОФЕКТ/КТ та КТЛА в диференціальній діагностиці ЛЕ, при застосуванні метода V/Q ОФЕКТ/КТ, показник чутливості та специфічності дорівнював 100 % [104]. За даними літературних джерел метод V/Q ОФЕКТ/КТ успішно застосовувався при передопераційному кількісному визначенні функціонального стану легень, визначенні полів опромінення при виконанні променевої терапії, оцінці регіональних змін при бронхіальній астмі, емфіземі або інтерстиціальній хворобі легень [134].

ОФЕКТ/КТ в кардіології.

Ішемічна хвороба серця (ІХС) на сьогоднішній день є основною причиною смертності у світі серед патологій серцево-судинної системи. За даними літературних джерел пацієнтам з низьким ризиком захворюваності ІХС, з метою диференціальної діагностики, рекомендується кардіо-комп'ютерна томографічна ангіографія (ККТА), у той час як пацієнтам з високим ризиком захворюваності – інвазивна коронарна ангіографія (ІКА). Група проміжного ризику, що включає більшість пацієнтів, потребує додаткового діагностичного аналізу з метою визначення гемодинамічних параметрів та кількісної оцінки ішемії на додаток до оцінки ступеня стенозу.

Перфузійна ОФЕКТ міокарда за допомогою радіоіндикаторів, які мічні ^{99m}Tc або ^{201}Tl застосовується з метою диференціальної діагностики, стратифікації ризику та прогнозування ІХС [32, 43, 59]. ОФЕКТ/КТ, що застосовується для здійснення корекції ослаблення, покращує надійність діагностики в інтерпретації досліджень, що стосуються лише фази стресу, таким чином, зменшуючи опромінення пацієнтів після впровадження даного протоколу [146]. КТ компонент ОФЕКТ/КТ також використовується з метою оцінки вмісту кальцію в коронарних артеріях (ККА) без істотного збільшення опромінення пацієнта [9, 141]. Слід зазначити, що ККТА має високу діагностичну точність для оцінки стенозу в коронарних артеріях [35]. В сучасній клінічній практиці широко застосовують системи ОФЕКТ/КТ з компонентами, які дозволяють забезпечити достатню роздільну здатність [63]. При поєднанні ІМП та КТ пацієнт

піддається впливу додаткового опромінення, що варіює від 0,5 до 1,0 мЗв. Поглинені дози при здійсненні ККА та ККТА залежать від пристрою та протоколів, що застосовуються. Для ККА дослідження показник поглиненої дози є нижчим від 1 мЗв, для ККТА – знаходиться в межах від 2 до 5 мЗв, для КТ сканерів останнього покоління – показник навіть нижче 1 мЗв [29, 73].

Застосування ОФЕКТ при неврологічній патології.

ОФЕКТ візуалізація перфузії головного мозку застосовується у випадках деменції та епілепсії шляхом використання ^{99m}Tc -НМРАО або ^{99m}Tc -етилцистеінатного димеру. Додавання до ОФЕКТ сегменту КТ не покращує діагностичної інформативності візуалізації у порівнянні, наприклад, з МРТ дослідженням [144]. Застосування ОФЕКТ/КТ при пухлинних процесах головного мозку з такими трейсерами, як ^{99m}Tc -МІВІ, ^{99m}Tc -тетрофосмін або ^{99m}Tc -біс-метіонін-ДТПА зазвичай обмежується диференціальною діагностикою між рецидивами пухлинного процесу та променевим некрозом.

ОФЕКТ шлунково-кишкового тракту.

Рутинними методами диференціальної діагностики шлунково-кишкової кровотечі в клінічній практиці є контрастна ангіографія та ендоскопічне дослідження. Серед методів радіонуклідної діагностики широко застосовується сцинтиграфія з ^{99m}Tc , міченими еритроцитарними клітинами (RBC), що є високочутливим, неінвазивним інструментом для виявлення кровотечі. Позитивні дослідження виявляють пацієнтів, що потребують негайного лікування, у випадках, якщо місце кровотечі локалізовано [38]. За допомогою методу ОФЕКТ/КТ оптимізовано пошук локалізації джерела кровотечі у понад ніж 30 % випадків [111]. ОФЕКТ/КТ виявив більшу чутливість (93 %) у порівнянні з планарною сцинтиграфією (86 %), а також точність визначення локалізації місця кровотечі – 92 %, по відношенню до планарної сцинтиграфії (74 %) [118]. З негативних аспектів методу ^{99m}Tc -RBC ОФЕКТ/КТ слід відзначити відносно тривалий час збору діагностичної інформації, а також виявлення артефактів з боку кишечника, що може вплинути на визначення правильної локалізації місця кровотечі [57, 129].

Застосування ОФЕКТ/КТ в педіатрії.

Застосування методу ОФЕКТ/КТ у дітей та підлітків може зменшити кількість подальших інструментальних досліджень в контексті встановлення діагнозу та значно скоротити у часі подальший діагностичний пошук [82]. Однак застосування КТ у дітей вимагає глибоких знань анатомії та фізіології, щоб збалансувати найкращий діагностичний показник із мінімальним променевим навантаженням [55, 92]. Необхідність використання та ступінь застосування КТ слід вибирати на основі клінічної картини захворювання, сцинтиграфічних результатів та попередніх способів діагностичної візуалізації [30, 85, 114]. В дитячій ортопедії, спортивній медицині та травматології за допомогою ОФЕКТ/КТ можна діагностувати джерело больового синдрому на рівні кіркового шару кістки, де метод МРТ має, зазвичай, меншу чутливість. У підлітків при болях в спині різного генезу, зокрема, спондиліозі, ОФЕКТ/КТ має діагностичне значення в умовах, коли рентгенографія та МРТ не мають можливості визначити джерело болю [101]. ОСГ та ОФЕКТ/КТ відіграє значну роль у дітей з підозрою на інфекційні ураження суглобів, ОМ, спондилодисцити та септичні артрити [30, 83, 122]. Додаткові клінічні показання для застосування методу ОФЕКТ/КТ у дітей включають рентгенологічно окультні стресові переломи та діагностику вроджених скелетних аномалій хребта [96].

В педіатричній онкології ОФЕКТ/КТ застосовують переважно в дагностиці солідних, нейробластичних пухлинах та раку щитовидної залози. За допомогою методу МРТ, зазвичай, оцінюють розмір та положення первинної пухлини по відношенню до навколишніх органів. ^{123}I -МІВІ ОФЕКТ/КТ візуалізація має високу діагностичну точність і позбавлена суперпозиції, небажаного ефекту, що властивий для площинних діагностичних методів візуалізації [58]. Слід зазначити, що для тривалого інструментального дослідження маленьких дітей, зазвичай, необхідне застосування анестезіологічного супроводження ОФЕКТ/КТ [58, 79]. Не зважаючи на те, що ДРЩЗ на сучасному етапі рідко зустрічається у малих дітей, він має зростаючу частоту та агресивний тип порівняно з дорослою групою населення [76]. Ви-

конання ^{123}I -МІВІ ОФЕКТ/КТ, як правило, не рекомендоване при ДРЩЗ низького ступеню ризику, але надає важливу діагностичну інформацію стосовно візуалізації залишкової тканини щитовидної залози, вузлових та віддалених метастазах у пацієнтів з високим ризиком ДРЩЗ [15, 85].

Обмежені літературні дані свідчать про те, що ОФЕКТ/КТ може потенційно збільшувати діагностичну роль планарної сцинтиграфії з $^{99\text{m}}\text{Tc}$ при дитячих інфекційних процесах [55, 95, 99], вроджених вадах серця тощо [80, 126].

Висновки і перспективи

В умовах сучасної ядерної медицини гібридна візуалізація набула широкої популярності, значною мірою після впровадження в клінічну практику ПЕТ/КТ [136]. Оптимізація отримання метаболічної або функціональної діагностичної інформації, що надається за рахунок ПЕТ або ОФЕКТ, здійснюється не тільки завдяки кращій кореляційній оцінці зміненого розподілу трейсера в анатомічних структурах, але й гібридній візуалізації в цілому, зокрема методу ОФЕКТ/КТ. Експерти з ядерної медицини вносять важливий внесок у покращення показників охорони здоров'я шляхом адаптації клінічних досліджень до потреб кожного конкретного пацієнта. Аналізуючи найбільш релевантні публікації на тему клінічної ОФЕКТ/КТ, поточний літературний огляд демонструє діагностичні переваги ОФЕКТ/КТ перед планарною сцинтиграфією у пацієнтів з широким спектром захворювань. У більшості описаних клінічних випадках метод ОФЕКТ/КТ повністю інтегрований в рутинний процес прийняття діагностичних та клінічних рішень. В той же час інформація, що зібрана під час цього огляду, також вказує на сфери, де застосування інтегрованих зображень ОФЕКТ/КТ ще не виявило певних дагностичних переваг. Відсутність масштабних досліджень та чіткої доказової бази не дозволяють науковій спільноті в повному обсязі перевести реалізацію ОФЕКТ/КТ на широкому спектр клінічних умов [70]. Бурхливий розвиток технологічного прогресу також в перспективі посилить діагнос-

тичну роль методу ОФЕКТ/КТ для оцінки дозиметричного аналізу в клінічній ядерній медицині [136].

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Література

1. Ткаченко М. М. Порівняльна характеристика остеосцинтиграфії і рентгенологічного дослідження при ендопротезуванні кульшових суглобів / М. М. Ткаченко, П. О. Король // Літопис травматології та ортопедії. – 2015. – № 1-2. – С. 171-172.
2. Ткаченко М. М. Пріоритети вибору інструментальних методів дослідження в діагностичному скринінгу при ендопротезуванні кульшових суглобів / М. М. Ткаченко, П. О. Король // Променева діагностика, променева терапія. – 2015. – № 2. – С. 34-36.
3. A prospective study comparing whole-body FDG PET/CT to combined planar bone scan with ^{67}Ga SPECT/CT in the diagnosis of spondylodiskitis / D. Fuster, O. Solà, A. Soriano [et al.] // Clin Nucl Med. – 2012. – Vol. 37. – P. 827-832. doi: 10.1097/RLU.0b013e318262ae6c.
4. A review on the clinical uses of SPECT/CT / G. Mariani, L. Bruselli, T. Kuwert [et al.] // Eur J Nucl Med Mol Imaging. – 2010. – Vol. 37. – P. 1959-1985. doi: 10.1007/s00259-010-1390-8.
5. Absolute quantification in SPECT / P. Ritt, H. Vija, J. Hornegger [et al.] // Eur J Nucl Med Mol Imaging. – 2011. – Vol. 38(Suppl1). – P. 69-77. <https://doi.org/10.1007/s00259-011-1770-8>.
6. Accuracy of bone SPECT/CT for identifying hard ware loosening in patients who under went lumbar fusion with pedicle screws / H. Hudyana, A. Maes, T. Vandenberghe [et al.] // Eur J Nucl Med Mol Imaging. – 2016. – Vol. 43. – P. 349-354. doi: 10.1007/s00259-015-3158-7.
7. Accuracy of dual phase single-photon emission computed tomography/computed tomography in primary hyperparathyroidism: correlation with serum parathyroid hormone levels / W. Koberstein, C. Fung, K. Romaniuk [et al.] // Can Assoc Radiol J. – 2016. – Vol. 67. – P. 115-121. doi: 10.1016/j.carj.2015.06.002.
8. Added value of $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -HMPAO-labeled leukocyte SPECT/CT in the characterization and management of patients with infectious endocarditis / P. A. Erba, U. Conti, E. Lazzeri [et al.] // J Nucl Med. – 2012. – Vol. 53. – P. 1235-1239. doi: 10.2967/jnumed.111.099424.

9. Agreement of visual estimation of coronary artery calcium from low-dose CT attenuation correction scans in hybrid PET/CT and SPECT/CT with standard Agatston score / A. J. Einstein, L. L. Johnson, S. Bokhari [et al.] // *J Amer Coll Cardiol.* – 2010. – Vol. 56. – P. 1914-1921. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2010.05.057>.
10. Alavi A. SPECT imaging in the era of PET and PET-CT: can it survive the test of time? / A. Alavi, S. P. Basu // *Eur J Nucl Med Mol Imaging.* – 2008. – Vol. 35. – P. 1554. <https://doi.org/10.1007/s00259-008-0813-2>.
11. American Thyroid Association Management Guidelines for Adult Patients with Thyroid Nodules and Differentiated Thyroid Cancer: The American Thyroid Association Guidelines Task Force on Thyroid Nodules and Differentiated Thyroid Cancer / B. R. Haugen, E. K. Alexander, K. C. Bible [et al.] // *Thyroid.* – 2016. – Vol. 26. – P. 1-133. doi: 10.1089/thy.2015.0020.
12. Application of white blood cell SPECT/CT to predict remission after a 6 or 12 week course of antibiotic treatment for diabetic foot osteomyelitis / J. Vouillarmet, M. Moret, I. Morelec [et al.] // *Diabetologia.* 2017. – 60. – P. 2486-2494. doi: 10.1007/s00125-017-4417-x.
13. Assessment of loading history of compartments in the knee using bone SPECT/CT: A study combining alignment and 99mTc-HDP tracer uptake/distribution patterns / M. T. Hirschmann, S. Schön, F. K. Afifi [et al.] // *J Orthop Res.* – 2013. – P. 31. – P. 268-274. doi: 10.1002/jor.22206.
14. Avram A. M. Preablation 131-I scans with SPECT/CT contribute to thyroid cancer risk stratification and 131-I therapy planning / A. M. Avram, N. H. Esfandiari, K. K. Wong // *J Clin Endocrinol Metab.* – 2015. – Vol. 100. – P. 1895-1902. doi: 10.1210/jc.2014-4043.
15. Avram A. M. Radioiodine scintigraphy with SPECT/CT: an important diagnostic tool for thyroid cancer staging and risk stratification / A. M. Avram // *J Nucl Med.* – 2012. – Vol. 53. – P. 754-764. doi: 10.2967/jnumed.111.104133. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3314-3_15.
16. Bone Single Photon Emission/Computed Tomography in the Detection of Sacroiliitis in Seronegative Spondyloarthritis: A Comparison with Magnetic Resonance Imaging / T. Pipikos, D. Kassimos, G. Angelidis [et al.] // *Mol Imag Radionucl Therapy.* – 2017. – Vol. 26. – P. 101-108. doi: 10.4274/mirt.50570.
17. Bone SPECT/CT in the postoperative spine: a focus on spinal fusion / K. Al-Riyami, G. Gnanasegaran, T. Van den Wyngaert [et al.] // *Eur J Nucl Med Mol Imaging.* – 2017. – Vol. 44. – P. 2094-2104. doi: 10.1007/s00259-017-3765-6.
18. Change in clinical management of sentinel lymph node location in early stage cervical cancer: the role of SPECT/CT / B. Díaz-Feijoo, M. A. Pérez-Benavente, S. Cabrera-Díaz [et al.] // *Gynecol Oncol.* – 2011. – Vol. 120. – P. 353-357. doi: 10.1016/j.ygyno.2010.12.336.
19. Chest radiographic findings in patients with acute pulmonary embolism: observations from the PIOPED Study / D. F. Worsley, A. Alavi, J. Aronchick [et al.] // *Radiology.* – 1993. – Vol. 189. – P. 133-136. doi: 10.1148/radiology.189.1.8372182.
20. Clinical applications of SPECT/CT after first I-131 ablation in patients with differentiated thyroid cancer / S. Y. Jeong, S. W. Lee SW, H. W. Kim [et al.] // *Clin Endocrinol.* – 2014. – Vol. 81. – P. 445-451. doi: 10.1111/cen.12460.
21. Clinical impact of SPECT/CT in the diagnosis and surgical management of hyper-parathyroidism / H. Tokmak, V. O. Demirkol, F. Alagöl [et al.] // *Int J Clin Exp Med.* – 2014. – Vol. 7. – P. 1028-1032.
22. Clinical impact of SPECT/CT with In-111 biotin on the management of patients with suspected spine infection / E. Lazzeri P. Erba, M. Perri [et al.] // *Clin Nucl Med.* – 2010. – Vol. 35. – P. 12-17. doi: 10.1097/RLU.0b013e3181c36173.
23. Clinical utility of 18 F-FDG positron emission tomography/computed tomography scan vs. 99m TcHMPAO white blood cell single-photon emission computed tomography in extra-cardiac work-up of infective endocarditis / T. K. Lauridsen, K. K. Iversen, N. Ihlemann [et al.] // *Int J Card Imaging.* – 2017. – Vol. 33. – P. 751-760. doi: 10.1007/s10554-016-1047-1.
24. Clinical utility of ultrasound and 99mTc sestamibi SPECT/CT for preoperative localization of parathyroid adenoma in patients with primary hyperparathyroidism / C. Patel, H. Salahudeen, M. Lansdown [et al.] // *Clin Radiol.* – 2010. – Vol. 65. – P. 278-287. doi: 10.1016/j.crad.2009.12.005.
25. Comparison between Tc-99m WBC SPECT/CT and MRI for the diagnosis of biopsy-proven diabetic foot osteomyelitis / J. LaFontaine, K. Bhavan, K. Lam [et al.] // *Wounds.* – 2016. – Vol. 28. – P. 271-278.
26. Comparison of CT 4D, ultrasonography, and 99mTc sestamibi SPECT/CT in localizing single-gland primary hyperparathyroidism / Y.J.

Suh, J.Y. Choi, K. Sej [et al.] // Otolaryngol Head Neck Surg. – 2015. – Vol. 152. – P. 438–443. doi: 10.1177/0194599814562195.

27. Comparison of SPECT/CT and MRI in diagnosing symptomatic lesions in ankle and foot pain patients: diagnostic performance and relation to lesion type / S. Ha, S. H. Hong, J. C. Paeng [et al.] // PLoS One. – 2015. – Vol. 10. – N 2. – P. 0117583. doi: 10.1371/journal.pone.0117583.

28. Cook G. J. Imaging bone metastases in breast cancer: staging and response assessment / G. J. Cook, G. K. Azad, V. Goh // J Nucl Med. – 2016. – Vol. 57 (Suppl 1). – P. 27-33. doi: 10.2967/jnumed.115.157867.

29. Coronary computed tomography angiography with a consistent dose below 1 mSv using prospectively electrocardiogram-triggered high-pitch spiral acquisition / S. Achenbach, M. Marwan, D. Ropers [et al.] // Eur Heart J. – 2009. – Vol. 31. – P. 340-346. doi: 10.1093/eurheartj/ehp470.

30. De Palma D. Skeletal scintigraphy with SPECT/CT in benign pediatric bone conditions / D. De Palma, H. R. Nadel, Z. Bar-Sever // Clin Transl Imaging. – 2016. – Vol. 4. – P. 191-201. <https://doi.org/10.1007/s40336-016-0169-8>.

31. Detection of low-grade prosthetic joint infections using 99mTc-antigranulocyte SPECT/CT: initial clinical results / V. Graute, M. Feist, S. Lehner [et al.] // Eur J Nucl Med Mol Imaging. – 2010. – Vol. 37. – P. 1751-1759. doi: 10.1007/s00259-010-1431-3.

32. Determinants of risk and its temporal variation in patients with normal stress myocardial perfusion scans: what is the warranty period of a normal scan? / R. Hachamovitch, S. Hayes, J. D. Friedman [et al.] // J Amer Coll Cardiol. – 2003. – Vol. 41. – P. 1329-1340. doi: 10.1016/s0735-1097(03)00125-6.

33. Diabetic foot infection: usefulness of SPECT/CT for 99mTc-HMPAO-labeled leukocyte imaging / L. Filippi, L. Uccioli, L. Giurato [et al.] // J Nucl Med. – 2009. – Vol. 50. – P. 1042-1046. doi: 10.2967/jnumed.108.059493.

34. Diagnostic and therapeutic impact of SPECT/CT in patients with unspecific pain of the hand and wrist / F.S. Schleich, M. Schürch, M.W. Huellner [et al.] // EJNMMI Res. – 2012. – Vol. 2. – P. 53. doi: 10.1186/2191-219X-2-53.

35. Diagnostic performance of 64-multidetector row coronary computed tomographic angiography for evaluation of coronary artery stenosis

in individuals without coronary artery disease: results from prospective multicenter ACCURACY (Assessment by Coronary Computed Tomographic Angiography of Individuals Undergoing Invasive Coronary Angiography) trial / M. J. Budoff, D. Dowe, J. G. Jollis [et al.] // J Amer Coll Cardiol. – 2008. – Vol. 52. – P. 1724-1732. doi: 10.1016/j.jacc.2008.07.031.

36. Diagnostic sensitivity of Tc-99m HYNIC PSMA SPECT/CT in prostate carcinoma: a comparative analysis with Ga-68 PSMA PET/CT / I. O. Lawal, A. O. Ankrah, N. P. Mokgoro [et al.] // Prostate. – 2017. – Vol. 77. – P. 1205-1212. doi: 10.1002/pros.23379.

37. Diagnostic test accuracy study of (18)F-sodium fluoride PET/CT, (99m)Tc-labelled diphosphonate SPECT/CT, and planar bone scintigraphy for diagnosis of bone metastases in newly diagnosed, high-risk prostate cancer / R. F. Fonager, H. D. Zacho, N. C. Langkilde [et al.] // Amer J Nucl Med Mol Imaging. – 2017. – Vol. 7. – P. 218-227.

38. Does hemodynamic instability predict positive technetium-labeled red blood cell scintigraphy in patients with acute lower gastrointestinal bleeding? / D. L. Feingold, F. J. Caliendo, B. T. Chinn [et al.] // A review of 50 patients. Dis Colon Rectum. – 2005. – Vol. 48. – P. 1001-1004. doi: 10.1007/s10350-004-0931-2.

39. Dual-isotope subtraction SPECT-CT in parathyroid localization / A. M. Woods, A. A. Bolster, S. Han [et al.] // Nucl Med Commun. – 2017. – Vol. 38. – P. 1047-1054. doi: 10.1097/MNM.0000000000000765.

40. Dual-phase 99mTc sestamibi scintigraphy with neck and thorax SPECT/CT in primary hyperparathyroidism: a single-institution experience / R. Ciappuccini, J. Morera, P. Pascal [et al.] // Clin Nucl Med. – 2012. – Vol. 37. – P. 223-228. doi: 10.1097/RLU.0b013e31823362e5.

41. EANM/SNMMI guideline for 18F-FDG use in inflammation and infection / F. Jamar, J. Buscombe, A. Chiti [et al.] // J Nucl Med. – 2013. – Vol. 54. – P. 647-658. doi: 10.2967/jnumed.112.112524.

42. Early detection of bony alterations in rheumatoid and erosive arthritis of finger joints with high-resolution single photon emission computed tomography, and differentiation between them / B. Ostendorf, K. Mattes-György, D. Reichelt [et al.] // Skelet Radiol. – 2010. – Vol. 39. – P. 55-59. DOI: 10.1007/s00256-009-0761-3.

43. Efficacy of noninvasive cardiac imaging tests in diagnosis and management of stable coronary artery disease / I.R. Mordi, A.A. Badar, R.J. Irving [et al.] // *Vasc Health Risk Manag.* – 2017. – Vol. 13. – P. 427-437. doi: 10.2147/VHRM.S106838.
44. Erba P.A. SPECT/CT in infection and inflammation / P.A. Erba, O. Israel // *Clin Transl Imaging.* – 2014. – Vol. 2. – P. 519-535.
45. Evaluation of bone viability in patients after girdlestone arthroplasty: comparison of bone SPECT/CT and MRI / G. Diederichs, P. Hoppe, F. Collettini [et al.] // *Skelet Radiol.* – 2017. – Vol. 46. – P. 1249-1258. doi: 10.1007/s00256-017-2692-8.
46. Evaluation of combined transmission and emission tomography for classification of skeletal lesions / M. Horger, S. M. Eschmann, C. Pfannenbergl [et al.] // *AJR Amer J Roentgen.* – 2004. – Vol. 183. – P. 655-661. doi: 10.2214/ajr.183.3.1830655.
47. Evaluation of Efficacy of Bone Scan With SPECT/CT in the Management of Low Back Pain / A. Jain, S. Jain, A. Agarwal [et al.] // *Clin J Pain.* – 2015. – Vol. 31. – P. 1054-1059. doi: 10.1097/AJP.0000000000000212.
48. Evaluation of osseous metastasis in bone scintigraphy / D. Davila, A. Antoniou, M. A. Chaudhry [et al.] // *Semin Nucl Med.* – 2015. – Vol. 45. – P. 3-15. doi: 10.1053/j.semnuclmed.2014.07.004.
49. Evaluation of patients with painful total hip arthroplasty using combined single photon emission tomography and conventional computerized tomography (SPECT/CT)—a comparison of semiquantitative versus 3D volumetric quantitative measurements / E. Barthassat, F. Afifi, P. Konala [et al.] // *BMC Med Imaging.* – 2017. – Vol. 17. – P. 31. doi: 10.1186/s12880-017-0204-x.
50. Evaluation of the diagnostic value of pre-operative sentinel lymph node (SLN) imaging in penile carcinoma patients without palpable inguinal lymph nodes via single photon emission computed tomography/computed tomography (SPECT/CT) as compared to planar scintigraphy / C. M. Naumann, C. Colberg, M. Jüptner [et al.] // *Urol Oncol.* – 2018. – Vol. 36. – № 92. – P. 17-24. doi: 10.1016/j.urolonc.2017.11.012.
51. Evaluation of ^{99m}Tc-labeled PSMA-SPECT/CT imaging in prostate cancer patients who have undergone biochemical relapse / H. C. Su, Y. Zhu, G. W. Ling [et al.] // *Asian J Androl.* – 2017. – Vol. 19. – P. 267. doi: 10.4103/1008-682X.192638.
52. Even-Sapir E. Imaging of malignant bone involvement by morphologic, scintigraphic, and hybrid modalities / E. Even-Sapir // *J Nucl Med.* – 2005. – Vol. 46. – P. 1356-1367.
53. Filippi L. Usefulness of hybrid SPECT/CT in ^{99m}Tc-HMPAO-labeled leukocyte scintigraphy for bone and joint infections / L. Filippi, O. Schillaci // *J Nucl Med.* – 2006. – Vol. 47. – P. 1908-1913.
54. Gadolinium-enhanced magnetic resonance angiography for pulmonary embolism: a multicenter prospective study (PIOPED III) / P. D. Stein, T. L. Chenevert, S. E. Fowler [et al.] // *Ann Intern Med.* – 2010. – Vol. 152. – P. 434-443. doi: 10.7326/0003-4819-152-7-201004060-00008.
55. Gelfand M. J. PET/CT and SPECT/CT dosimetry in children: the challenge to the pediatric imager / M. J. Gelfand, L. C. Lemen // *Semin Nucl Med.* – 2007. – Vol. 37. – P. 391-398. doi: 10.1053/j.semnuclmed.2007.05.002.
56. Glu Ureido-Based Inhibitors of Prostate-Specific Membrane Antigen: Lessons Learned During the Development of a Novel Class of Low-Molecular-Weight Theranostic Radiotracers / K. Kopka, M. Benešová, C. Bařinka // *J Nucl Med* – 2017. – Vol. 58. – Suppl 2. – P. 17-26. doi: 10.2967/jnumed.116.186775.
57. Grady E. Gastrointestinal bleeding scintigraphy in early 21st century / E. Grady // *J Nucl Med.* – 2016. – Vol. 57. – P. 252-259. doi: 10.2967/jnumed.115.157289.
58. Guidelines on nuclear medicine imaging in neuroblastoma / Z. Bar-Sever, L. Biassoni, B. Shulkin [et al.] // *Eur J Nucl Med Mol Imaging.* – 2018. – Vol. 45. – P. 2009-2024. doi: 10.1007/s00259-018-4070-8.
59. Half-time SPECT myocardial perfusion imaging with attenuation correction / I. Ali, T. D. Ruddy, A. Almgrahi [et al.] // *J Nucl Med.* – 2009. – Vol. 50. – P. 554-562. doi: 10.2967/jnumed.108.058362.
60. Hybrid Bone SPECT/CT Imaging in Evaluation of Chronic Low Back Pain: Correlation with Facet Joint Arthropathy / V. M. Russo, R. T. Dhawan, I. Baudracco [et al.] // *World Neurosurg.* – 2017. – Vol. 107. – P. 732-738. doi: 10.1016/j.wneu.2017.08.092.
61. Hybrid imaging with ^{99m}Tc-WBC SPECT/CT to monitor effect of therapy in diabetic foot osteomyelitis / F. Lazaga, S. A. Van Asten, A. Nichols [et al.] // *Int Wound J.* – 2016. – Vol. 13. – P. 1158-1160. doi: 10.1111/iwj.12433.

62. Hybrid imaging worldwide—challenges and opportunities for the developing world: a report of a technical meeting organized by IAEA / R. Kashyap, M. Dondi, D. Paez // *Semin Nucl Med.* – 2013. – Vol. 43. – P. 208-223. doi: 10.1053/j.semnucmed.2013.02.001.
63. Hybrid myocardial perfusion SPECT/Ct-coronary angiography and invasive coronary angiography in patients with stable angina pectoris lead to similar treatment decisions / J. Schaap, J. A. deGroot, K. Nieman, [et al.] // *Heart.* – 2013. – Vol. 99. – P. 188-194. doi: 10.1136/heartjnl-2012-302761.
64. Imaging non-specific wrist pain: inter observer agreement and diagnostic accuracy of SPECT/CT, MRI, CT, bone scan and plain radiographs / M. W. Huellner, A. Bürkert, K. Strobel [et al.] // *PLoS One.* – 2013. – Vol. 8. – P. 85359. doi: 10.1371/journal.pone.0085359.
65. Impact of ¹³¹I-SPECT/CT images obtained with an integrated system in the follow-up of patient with thyroid carcinoma / K. Tharp, O. Israel, J. Hausmann [et al.] // *Eur J Nucl Med Mol Imaging.* – 2004. – Vol. 31. – P. 1435-1442. doi: 10.1007/s00259-004-1565-2.
66. Increased bone tracer uptake in symptomatic patients with ACL graft insufficiency: a correlation of MRI and SPECT/CT findings / D. T. Mathis, A. Hirschmann, A. L. Falkowski [et al.] // *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* – 2018. – Vol. 26. – N 2. – P. 563-73. doi: 10.1007/s00167-017-4588-5.
67. Incremental diagnostic utility of systematic double-bed SPECT/CT for bone scintigraphy in initial staging of cancer patients / C. Guezenec, N. Keromnes, P. Robin [et al.] // *Cancer Imaging.* – 2017. – Vol. 17. – P. 16. doi: 10.1186/s40644-017-0118-4.
68. Incremental value of ¹³¹I SPECT/CT in the management of patients with differentiated thyroid carcinoma / L. Chen, Q. Luo, Y. Shen [et al.] // *J Nucl Med.* – 2008. – Vol. 49. – P. 1952-1957. doi: 10.2967/jnumed.108.052399.
69. Is there a Role for Gallium-67 Citrate SPECT/CT, in Patients with Renal Impairment or Who are Renal Transplant Recipients, in Identifying and Localizing Suspected Infection? / E. Nowosinska, S. Navalkisoor, A. M. Quigley [et al.] // *World J Nucl Med.* – 2015. – Vol. 14. – P. 184-188. doi: 10.4103/1450-1147.163250.
70. Korol P. The role of radioactive methods in the diagnostic type of hydronephrosis in clean-up workers of Chornobyl accident / P. Korol, M. Tkachenko // *Problems of radiation medicine and radiobiology.* — 2018. — Vol. 23. — P. 352-358. <https://doi.org/10.33145/2304-8336-2018-23-351-358>.
71. Kuwert T. Skeletal SPECT/CT: a review / T. Kuwert // *Clin Transl Imaging.* – 2014. – Vol. 2. – N 6. – P. 505-517. doi: 10.1007/s00259-011-1770-8. <https://doi.org/10.1007/s40336-014-0090-y>.
72. Leukocyte SPECT/CT for detecting infection of left-ventricular-assist devices: preliminary results / P. Y. Litzler, A. Manrique, M. Etienne [et al.] // *J Nucl Med.* – 2010. – Vol. 51. – P. 1044-1048. doi: 10.2967/jnumed.109.070664.
73. Low-dose computed tomography coronary angiography with prospective electrocardiogram triggering: feasibility in a large population / R. R. Buechel, L. Husmann, B. A. Herzog [et al.] // *J Amer Coll Cardiol.* – 2011. – Vol. 57. – P. 332-336. doi: 10.1016/j.jacc.2010.08.634.
74. Lymphoscintigraphy for sentinel node mapping using a hybrid SPECT/CT system. / E. Even-Sapir, H. Lerman, G. Lievshitz [et al.] // *J Nucl Med* // 2003. – Vol. 44. – P. 1413-1420.
75. Mahaletchumy T. Incremental value of single-photon emission computed tomography-computed tomography for characterization of skeletal lesions in breast cancer patients / T. Mahaletchumy, A. AbAziz // *World J Nucl Med.* – 2017. – Vol. 16. – P. 303-310. doi: 10.4103/1450-1147.215496.
76. Management guidelines for children with thyroid nodules and differentiated thyroid cancer: the American Thyroid Association guidelines task force on pediatric thyroid cancer / G. L. Francis, S. G. Waguespack, A. J. Bauer [et al.] // *Thyroid.* – 2015. – Vol. 25. – P. 716-759. doi: 10.1089/thy.2014.0460.
77. Mariani G. Positron emission and single-photon emission imaging: synergy rather than competition / G. Mariani, H. W. Strauss // *Eur J Nucl Med Mol Imaging.* – 2011. – Vol. 38. P. 1189-1190. doi: 10.1007/s00259-011-1767-3.
78. Metabolic disturbances identified by SPECT-CT in patients with clinical diagnosis of sacroiliac joint incompetence / M. Cusi, J. Saunders, H. Van der Wall [et al.] // *Eur Spine J.* – 2013. – Vol. 22. – P. 1674-1682. doi: 10.1007/s00586-013-2725-5.
79. MIBG in neuroblastoma diagnostic imaging and therapy / S. E. Sharp, A. T. Trout, B. D. Weiss [et al.] // *Radiographics.* – 2016. – Vol. 36. – P. 258-278. doi: 10.1148/rg.2016150099.

80. Milanese O. Nuclear medicine in pediatric cardiology / O. Milanese, G. Stellin, P. Zucchetta // *Semin Nucl Med.* – 2017. – Vol. 47. – P. 158-169. doi: 10.1053/j.semnuclmed.2016.10.008.
81. Molecular and functional imaging of bone metastases in breast and prostate cancers: an overview / G. K. Azad, B. Taylor, D. Rubello [et al.] // *Clin Nucl Med.* – 2016. – Vol. 41. – P. 44-50. doi: 10.1097/RLU.0000000000000993.
82. Nadel H. R. SPECT/CT in pediatric patient management / H. R. Nadel // *Eur J Nucl Med Mol Imaging.* – 2014. – Vol. 41(Suppl 1). – P. 104-114. doi: 10.1007/s00259-014-2697-7.
83. Nuclear medicine applications in pediatric musculoskeletal diseases: the added value of hybrid imaging / M. T. Parisi, R. S. Iyer, A. L. Stanescu [et al.] // *Musculoskelet Radiol.* – 2018. – Vol. 22. – P. 25-45. doi: 10.1055/s-0037-1615782.
84. Painful knee prosthesis: can we help with bone SPECT/CT? / K. Al-Nabhani, S. Michopoulos, R. Allie [et al.] // *Nucl Med Commun.* – 2014. – Vol. 35. – P. 1820188. doi: 10.1097/MNM.0000000000000028.
85. Parisi M. T. Management of differentiated thyroid cancer in children: focus on the American Thyroid Association pediatric guidelines / M. T. Parisi, H. Eslamy, D. Mankoff // *Semin Nucl Med.* – 2016. – Vol. 46. – P. 147-164. doi: 10.1053/j.semnuclmed.2015.10.006.
86. Patterns of bone tracer uptake on SPECT-CT in symptomatic and asymptomatic patients with primary total hip arthroplasty / T. Schweizer, F. F. Schiapparelli, N. Rotigliano [et al.] // *Eur J Nucl Med Mol Imaging.* – 2018. – Vol. 45. – P. 283-291. doi: 10.1007/s00259-017-3827-9.
87. Phase 2 study of ^{99m}Tc-Trofolostat SPECT/CT to identify and localize prostate cancer in intermediate-and high-risk patients undergoing radical prostatectomy and extended pelvic LN dissection / K. E. Goffin, S. Joniau, P. Tenke [et al.] // *J Nucl Med.* – 2017. – Vol. 58. – P. 1408-1413. doi: 10.2967/jnumed.116.187807.
88. Potential role of multislice SPECT/CT in impingement syndrome and soft-tissue pathology of the ankle and foot / S. Chicklore, G. Gnanasegaran, S. Vijayanathan [et al.] // *Nucl Med Commun.* – 2013. – Vol. 4. – P. 130-139. doi: 10.1097/MNM.0b013e32835c0964.
89. Prognostic Value of ^{99m}Tc-Sestamibi Parathyroid Scintigraphy in Predicting Future Surgical Eligibility in Patients With Asymptomatic Primary Hyperparathyroidism / Z. Cheng, S. Zou, D. Peng [et al.] // *Clin Nucl Med.* – 2018. – Vol. 43. – P. 151-154. doi: 10.1097/RLU.0000000000001941.
90. Prospective evaluation of planar bone scintigraphy, SPECT, SPECT/CT, ¹⁸F-NaF PET/CT and whole body 1.5T MRI, including DWI, for the detection of bone metastases in high risk breast and prostate cancer patients: SKELETA clinical trial / I. Jambor, A. Kuisma, S. Ramadan [et al.] // *Acta Oncol.* – 2016. – Vol. 55. – P. 59-67. doi: 10.3109/0284186X.2015.1027411.
91. PSMA ligands for PET imaging of prostate cancer / S.M. Schwarzenboeck, I. Rauscher, C. Bluemel [et al.] // *J Nucl Med.* – 2017. – Vol. 58. – P. 154501552. doi: 10.2967/jnumed.117.191031.
92. Radiation risk and protection of patients in clinical SPECT/CT / G. Brix, E. A. Nekolla, M. Borowski [et al.] // *Eur J Nucl Med Mol Imaging.* – 2014. – Vol. 41 (Suppl 1). – P. 125-136. <https://doi.org/10.1007/s00259-013-2543-3>.
93. Radiolabeled WBC scintigraphy in the diagnostic work-up of patients with suspected device-related infections / P. A. Erba, M. Sollini, U. Conti [et al.] // *JACC Cardiovasc Imaging.* – 2013. – Vol. 6. – P. 1075-1086. doi: 10.1016/j.jcmg.2013.08.001.
94. Radionuclide arthrogram with SPECT/CT for the evaluation of mechanical loosening of hip and knee prostheses / C. G. Chew, P. Lewis, F. Middleton [et al.] // *Ann Nucl Med.* – 2010. – Vol. 24. – P. 735-743. doi: 10.1007/s12149-010-0419-1.
95. Radionuclide imaging of infection and inflammation in children: a review / M. T. Parisi, J. P. Otjen, A. L. Stanescu [et al.] // *Semin Nucl Med.* – 2018. – Vol. 48. – P. 148-165. doi: 10.1053/j.semnuclmed.2017.11.002.
96. Review of running injuries of the foot and ankle: clinical presentation and SPECT-CT imaging patterns / M. Pelletier-Galarneau, P. Martineau, M. Gaudreault [et al.] // *Amer J Nucl Med Mol Imaging.* – 2015. – Vol. 5. – P. 305.
97. Role of SPECT/CT compared with MRI in the diagnosis and management of patients with wrist trauma occult fractures / S. Querrelou, L. Arnaud, T. Williams [et al.] // *Clin Nucl Med.* – 2014. – Vol. 39. – P. 8-13. doi: 10.1097/RLU.0b013e3281828164da.
98. Single photon emission computed tomography (SPECT)/computed tomography using Iodine-123 in patients with differentiated thyroid cancer: additional value over whole body planar

imaging and SPECT / T. Barwick, I. Murray, H. Megadmi [et al.] // *Eur J Endocrinol.* – 2010. – Vol. 162. – P. 1131-1139. doi: 10.1530/EJE-09-1023.

99. SNMMI and EANM practice guideline for meckel diverticulum scintigraphy 2.0. / S. E. Spottswood, T. Pfluger, S. P. Bartold [et al.] // *J Nucl Med Tech.* – 2014. – Vol. 42. – P. 163-169. doi: 10.2967/jnmt.113.136242.

100. SPECT/CT arthrography / U. Bhure, J.E. Roos, M.D.S. Pérez Lago [et al.] // *Br J Radiol.* – 2018. – Vol. 91. – N 1082. – P. 20170635.

101. SPECT/CT bone scintigraphy to evaluate low back pain in young athletes: common and uncommon etiologies / M. Matesan, F. Behnia, M. Bermo [et al.] // *J Orthop Surg Res.* – 2016. – Vol. 11. – P. 76. doi: 10.1186/s13018-016-0402-1.

102. SPECT/CT in differentiation of pseudarthrosis from other causes of back pain in lumbar spinal fusion: report on 10 consecutive cases / O. Rager, K. Schaller, M. Payer [et al.] // *Clin Nucl Med.* – 2012. – Vol. 37. – P. 339-343. doi: 10.1097/RLU.0b013e318239248b.

103. SPECT/CT in patients with lower back pain after lumbar fusion surgery / J. Sumer, D. Schmidt, P. Ritt [et al.] // *Nucl Med Commun.* – 2013. – Vol. 34. – P. 964-970. <https://doi.org/10.1097/MNM.0b013e328363cf81>.

104. SPECT/CT in V/Q scanning / P. J. Roach, Gradinscak D. J., Schembri G. P. [et al.] // *Semin Nucl Med.* – 2010. – Vol. 40. – P. 455-466.

105. SPECT/CT of the foot / H. Biersack, C. Wingenfeld, B. Hinterthaler [et al.] // *Nuklearmedizin.* – 2012. – Vol. 51. – P. 26-31. doi: 10.3413/nukmed-0421-11-08.

106. SPECT/CT stabilizes the interpretation of somatostatin receptor scintigraphy findings: a retrospective analysis of inter-rater agreement / I. Apostolova, S. Riethdorf, R. Buchert [et al.] // *Ann Nucl Med.* – 2010. – Vol. 24. – P. 477-483. doi: 10.1007/s12149-010-0383-9.

107. SPECT/CT tracer uptake is influenced by tunnel orientation and position of the femoral and tibial ACL graft insertion site / M.T. Hirschmann, D. Mathis, H. Rasch [et al.] // *Int Orthop.* – 2013. – Vol. 37. – N 2. – P. 301-309. <https://doi.org/10.1007/s00264-012-1704-5>.

108. SPECT/CT using ⁶⁷Ga and ¹¹¹In-labeled leukocyte scintigraphy for diagnosis of infection / R. Bar-Shalom, N. Yefremov, L. Guralnik [et al.] // *J Nucl Med.* – 2006. – Vol. 47. – P. 587-594.

109. SPECT ventilation perfusion scanning with the addition of low-dose CT for the investi-

gation of suspected pulmonary embolism / I. Ling, H. Naqvi, T. Siew [et al.] // *Intern Med J.* – 2012. – Vol. 42. – P. 1257-1261. doi: 10.1111/j.1445-5994.2012.02939.x.

110. SPECT/CT versus MRI in patients with non-specific pain of the hand and wrist – a pilot study / M. W. Huellner, A. Bürkert, F. S. Schleich [et al.] // *Eur J Nucl Med Mol Imaging.* – 2012. – Vol. 39. – P. 750-759. doi: 10.1007/s00259-011-2034-3.

111. SPECT/CT with a hybrid imaging system in the study of lower gastrointestinal bleeding with technetium-99m red blood cells / O. Schillaci, A. Spanu, L. Tagliabue [et al.] // *Quart J Nucl Med Mol Imaging.* – 2009. – Vol. 53. – P. 281-289.

112. SPECT/CT with the PSMA ligand ^{99m}Tc-MIP-1404 for whole-body primary staging of patients with prostate cancer / C. Schmidkonz, M. Cordes, M. Beck [et al.] // *Clin Nucl Med.* – 2018. – Vol. 43. – P. 225-231. doi: 10.1097/RLU.0000000000001991.

113. SPECT/CT's advantage for preoperative localization of small parathyroid adenomas in primary hyperparathyroidism / P. Sandqvist, I. L. Nilsson, P. Grybäck [et al.] // *Clin Nucl Med.* 2017. – Vol. 42. – P. 109-114. doi: 10.1097/RLU.0000000000001447.

114. Spondylolysis and beyond: value of SPECT/CT in evaluation of low back pain in children and young adults / A. T. Trout, S. E. Sharp, C. G. Anton [et al.] // *Radiographics.* – 2015. – Vol. 35. – P. 819-834. doi: 10.1148/rg.2015140092.

115. Symptomatic versus asymptomatic knees after bilateral total knee arthroplasty: what is the difference in SPECT/CT? / R. Awengen, H. Rasch, F. Amsler [et al.] // *Eur J Nucl Med Mol Imaging.* – 2016. – Vol. 43. – P. 762-772. <https://doi.org/10.1007/s00259-015-3278-0>.

116. Tamm A.S. Bone and gallium single-photon emission computed tomography-computed tomography is equivalent to magnetic resonance imaging in the diagnosis of infectious spondylodiscitis: A retrospective study / A. S. Tamm, J. T. Abele // *Can Assoc Radiol J.* – 2017. – Vol. 68. – P. 41-46. doi: 10.1016/j.carj.2016.02.003.

117. Technetium-99m-MIBI SPECT/CT in primary hyperparathyroidism / Y. Krausz, L. Bettman, L. Guralnik [et al.] // *World J Surg.* – 2006. – Vol. 30. – P. 76-83. doi: 10.1007/s00268-005-7849-2.

118. Technological value of SPECT/CT fusion imaging for the diagnosis of lower gastrointestinal bleeding / Z. Wang, G. Zhang, S. Hao [et al.]

// Genet Mol Res. – 2015. – Vol. 14. – P. 14947-14955. doi: 10.4238/2015.November.24.2.

119. The added value of SPECT/CT in sentinel lymph nodes mapping for endometrial carcinoma / Y. Naaman, L. Pinkas, S. Roitman [et al.] // Ann Surg Oncol. – 2016. – Vol. 23. – P. 450-455. doi: 10.1245/s10434-015-4877-5.

120. The application of SPECT/CT for preoperative planning in patients with secondary hyperparathyroidism / L. Zhen, H. Li, X. Liu [et al.] // Nucl Med Commun. – 2013. – Vol. 34. – P. 439-444. doi: 10.1097/MNM.0b013e32835f9447.

121. The diagnostic accuracy of neck ultrasound, 4D-Computed tomography and sestamibi imaging in parathyroid carcinoma / I. Christakis, T. Vu, H.H. Chuang [et al.] // Eur J Radiol. – 2017. – Vol. 95. – P. 82-88. doi: 10.1016/j.ejrad.2017.07.026.

122. The EANM practice guidelines for bone scintigraphy / T. Van den Wyngaert, K. Strobel, W. Kampen [et al.] // Eur J Nucl Med Mol Imaging. – 2016. – Vol. 43. – P. 1723-1738. doi: 10.1007/s00259-016-3415-4.

123. The EANM practical guidelines for sentinel lymph node localisation in oral cavity squamous cell carcinoma / F. Giammarile, C. Schilling, G. Gnanasegaran [et al.] // Eur J Nucl Med Mol Imaging. – 2019. – Vol. 46. – P. 623-637. doi: 10.1007/s00259-018-4235-5.

124. The effect of posttherapy ^{131}I SPECT/CT on risk classification and management of patients with differentiated thyroid cancer / R. K. Grewal, R. Michael Tuttle, J. Fox [et al.] // J Nucl Med. – 2010. – Vol. 51. – P. 1361-1366. <https://doi.org/10.2967/jnumed.110.075960>.

125. The efficacy of ^{18}F -FDG PET/CT and ^{67}Ga SPECT/CT in diagnosing fever of unknown origin / B. T. Hung, P. W. Wang, Y. J. Su [et al.] // Int J Infect Dis. – 2017. – Vol. 62. – P. 10-17. doi: 10.1016/j.ijid.2017.06.019.

126. The high incidence and bioethics of findings on magnetic resonance brain imaging of normal volunteers for neuroscience research / N. Hoggard, G. Darwent, D. Capener [et al.] // J Med Ethics. – 2009. – Vol. 35. – P. 194-199. doi: 10.1136/jme.2008.025502.

127. The ideal dual-isotope imaging combination in evaluating patients with suspected infection of pelvic pressure ulcers / S.I. Heiba, L. Stempler, T. Sullivan [et al.] // Nucl Med Commun. – 2017. – Vol. 38. – P. 129-134. doi: 10.1097/MNM.0000000000000625.

128. The impact of post-radioiodine therapy SPECT/CT on early risk stratification in differentiated thyroid cancer; a bi-institutional study / S. Szujó, L. Sira, L. Bajnok L [et al.] // Oncotarget. – 2017. – Vol. 8. – P. 79825. doi: 10.18632/oncotarget.19781.

129. The SNMMI procedure standard/EANM practice guideline for gastrointestinal bleeding scintigraphy 2.0. / H. Q. Dam, D. C. Brandon, V. V. Grantham [et al.] // J Nucl Med Tech. – 2014. – Vol. 42. – P. 308-317. doi: 10.2967/jnmt.114.147959.

130. The underestimation of segmental defect size in radionuclide lung scanning / N. Morrell, K. Nijran, B. Jones [et al.] // J Nucl Med. – 1993. – Vol. 34. – P. 370-374.

131. The use of SPECT/CT for anatomical mapping of lymphatic drainage in vulvar cancer: possible implications for the extent of inguinal lymph node dissection / A. Collarino, M. L. Donswijk, W. J. van Driel [et al.] // Eur J Nucl Med Mol Imaging. – 2015. – Vol. 42. – P. 2064-2071. doi: 10.1007/s00259-015-3127-1.

132. The value of SPECT/CT in localizing pain site and prediction of treatment response in patients with chronic low back pain / I. Lee, H. Budiawan, J. Y. Moon [et al.] // J Korean Med Sci. – 2014. – Vol. 29. – P. 1711-1716. doi: 10.3346/jkms.2014.29.12.1711.

133. The value of $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -sestamibi SPECT/CT over conventional SPECT in the evaluation of parathyroid adenomas or hyperplasia / I. W. Gayed, E. E. Kim, W. F. Broussard [et al.] // J Nucl Med. – 2005. – Vol. 46. – P. 248-252. doi: 10.3389/fmed.2019.00164.

134. Thoracoscopic lung volume reduction surgery for emphysema. Evaluation using ventilation-perfusion scintigraphy / K. Nezu, K. Kushibe, N. Sawabata [et al.] // Jpn J Thorac Cardiovasc Surg. – 1999. – Vol. 47. – P. 267-272. <https://doi.org/10.1007/BF03218008>.

135. Tkachenko M. The role of three-phase bone scintigraphy in arthroplasty of hip and knee joints of clean/up workers of Chornobyl accident / M. Tkachenko, P. Korol // Problems of radiation medicine and radiobiology. – 2017. – Vol. 22. – P. 476-483. <https://doi.org/10.33145/2304-8336-2017-22-476-483>.

136. Two decades of SPECT/CT – the coming of age of a technology: An updated review of literature evidence / O. Israel, O. Pellet, L. Biassoni [et al.] // Eur J Nucl Med Mol Imaging. – 2019. – Vol. 46. – P. 1990-2012. doi: 10.1007/s00259-019-04404-6.

137. ^{99m}Tc -labeled small-molecule inhibitors of prostate-specific membrane antigen for molecular imaging of prostate cancer / S. M. Hillier, K. P. Maresca, G. Lu [et al.] // *J Nucl Med.* – 2013. – Vol. 54. – P. 1369-1376. doi: 10.2967/jnumed.112.116624.
138. ^{99m}Tc -MIP-1404-SPECT/CT for the detection of PSMA-positive lesions in 225 patients with biochemical recurrence of prostate cancer / C. Schmidkonz, C. Hollweg, M. Beck [et al.] // *Prostate.* – 2018. – Vol. 78. – P. 54-63. doi: 10.1002/pros.23444.
139. ^{99m}Tc -WBC scintigraphy with SPECT/CT in the evaluation of arterial graft infection / L. Lou, K. N. Alibhai, R. G. Turnbull [et al.] // *Nucl Med Commun.* – 2010. – Vol. 31. – P. 411-416. doi: 10.1097/MNM.0b013e328337142c.
140. Uptake in the pancreatic uncinate process on the ^{111}In -octreotide scintigraphy: How to distinguish physiological from pathological uptake? / A. Ait Boudaoud, B. Verges, J. M. Petit [et al.] // *Nucl Med Commun.* – 2017. – Vol. 38. – P. 737-743. doi: 10.1097/MNM.0000000000000710.
141. Use of coronary calcium score scans from stand-alone multislice computed tomography for attenuation correction of myocardial perfusion SPECT / T. Schepis, O. Gaemperli, P. Koepfli [et al.] // *Eur J Nucl Med Mol Imaging.* – 2007. – Vol. 34. – P. 11-19. doi: 10.1007/s00259-006-0173-8.
142. Use of hybrid SPECT/CT for diagnosis of radiographic occult fractures of the wrist / L. Allainmat, M. Aubault, V. Noël [et al.] // *Clin Nucl Med.* – 2013. – Vol. 38. – P. 246-251. doi: 10.1097/RLU.0b013e318263819e.
143. Usefulness of adding SPECT/CT to ^{99m}Tc -hexamethylpropylene amine oxime (HMPAO)-labeled leukocyte imaging for diagnosing prosthetic joint infections / H. O. Kim, S. J. Na, S. J. Oh // *J Comput Assist Tomogr.* – 2014. – Vol. 38. – P. 313-319. doi: 10.1097/RCT.0000000000000011.
144. Usefulness of SPECT/CT with a hybrid camera for the functional anatomical mapping of primary brain tumors by [^{99m}Tc] tetrofosmin / L. Filippi, O. Schillaci, R. Santoni [et al.] // *Cancer Biother Radiopharm.* – 2006. – Vol. 21. – P. 41-48. doi: 10.1089/cbr.2006.21.41.
145. Utility of adding SPECT/CT imaging to post-therapeutic radioiodine whole-body scan in patients with differentiated thyroid cancer / J. Sripraporn, C. Sethanandha, T. Yingsa-nga [et al.] // *J Med Assoc Thail.* – 2015. – Vol. 98. – P. 596-605.
146. Value of attenuation correction in stress-only myocardial perfusion imaging using CZT-SPECT / J. van Dijk, M. Mouden, J. Ottervanger [et al.] // *J Nucl Cardiol.* – 2017. – Vol. 24. – P. 395-401. doi: 10.1007/s12350-015-0374-2.
147. Vouillarmet J. Assessing diabetic foot osteomyelitis remission with white blood cell SPECT/CT imaging / J. Vouillarmet, I. Morelec, C. Thivolet // *Diabet Med.* – 2014. – Vol. 31. – P. 1093-1099. doi: 10.1111/dme.12445.
148. White paper of the European Association of Nuclear Medicine (EANM) and the European Society of Radiology (ESR) on multimodality imaging / A. Bischof Delaloye, I. Carrió, A. Cuocolo [et al.] // *Eur J Nucl Med Mol Imaging.* – 2007. – Vol. 34. – P. 1147-1151. doi: 10.1007/s00259-007-0494-2.
149. Whole-body bone SPECT in breast cancer patients: The future bone scan protocol? / G. Abikhzer, K. Gourevich, O. Kagna [et al.] // *Nucl Med Commun.* – 2016. – Vol. 37. – P. 247-253. doi: 10.1097/MNM.0000000000000427.
150. Whole-body SPECT/CT versus planar bone scan with targeted SPECT/CT for metastatic workup / O. Rager, R. Nkoulou, N. Exquis [et al.] // *Bio Med Research Intern.* – 2017. doi: 10.1155/2017/7039406
151. Whole-remnant and maximum-voxel SPECT/CT dosimetry in ^{131}I -NaI treatments of differentiated thyroid cancer / P. Mínguez, G. Flux, J. Genollá [et al.] // *Med Phys.* – 2016. – Vol. 43. – P. 5279-5287. doi: 10.1118/1.4961742.
152. Why the European Association of Nuclear Medicine has declined to endorse the 2015 American Thyroid Association management guidelines for adult patients with thyroid nodules and differentiated thyroid cancer / F. A. Verburg, C. Aktolun, A. Chiti [et al.] // *Eur J Nucl Med Mol Imaging.* – 2016. – Vol. 43. – P. 1001-1005. doi: 10.1007/s00259-016-3327-3.

ДОСВІД ДВАДЦЯТИРІЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ ОФЕКТ/КТ В ЯДЕРНІЙ МЕДИЦИНІ

П.О. Король, М.М. Ткаченко, О.В. Щербіна

В огляді розглянуто результати двадцятирічного досвіду застосування однофотонної емісійної комп'ютерної томографії/

комп'ютерної томографії (ОФЕКТ/КТ). Гібридна візуалізація, що включає застосування ОФЕКТ у поєднанні з КТ, транслює молекулярну та метаболічну інформацію безпосередньо на клінічний вплив широкого спектру захворювань. В той же час ОФЕКТ/КТ додатково покращує показники діагностичної точності, специфічності та позитивної прогностичної цінності досліджень ядерної медицини. Було визнано доцільним здійснення огляду сучасних застосувань ОФЕКТ/КТ, не тільки з позицій діагностичного інструменту, а з врахуванням інтегрування даної модальності в клінічний процес. З цією метою вирішуються складні технологічні питання залучення до використання ОФЕКТ/КТ нових радіофармпрепаратів, підвищення якості протоколів отримання діагностичних зображень, кількісної оцінки, а також складання протоколів дозиметрії та радіаційного опромінення, що виходять за межі поточного огляду.

Ключові слова: однофотонна емісійна комп'ютерна томографія, гібридна візуалізація, ядерна медицина, радіо фармпрепарат.

ОПЫТ ДВАДЦАТИЛЕТНЕГО ПРИМЕНЕНИЯ ОФЭКТ/КТ В ЯДЕРНОЙ МЕДИЦИНЕ

*П.А. Король, М.Н. Ткаченко,
О.В. Щербина*

В обзоре рассмотрены результаты двадцатилетнего опыта применения однофотонной эмиссионной компьютерной томографии/компьютерной томографии (ОФЭКТ/КТ). Гибридная визуализация, включающая применение ОФЭКТ в сочетании с КТ, транслирует молекулярную и метаболическую информацию непосредственно на клиническое влияние широкого спектра заболеваний. В то же время ОФЭКТ/КТ дополнительно улучшает показатели диагностической точности, специфичности и положительной прогностической ценности исследований ядерной медицины. Было признано целесообразным выполнение обзора современных приложений ОФЭКТ/КТ, не только с позиций диагно-

стического инструмента, а также с расчетом интегрирования данной модальности в клинический процесс. С этой целью решаются сложные технологические вопросы привлечения к использованию ОФЭКТ/КТ новых радиофармпрепаратов, повышения качества протоколов получения диагностических изображений, количественной оценки, а также составление протоколов дозиметрии и радиационного облучения, выходящих за пределы текущего обзора.

Ключевые слова: однофотонная эмиссионная компьютерная томография, гибридная визуализация, ядерная медицина, радиофармпрепарат.

TWENTY-YEAR EXPERIENCE WITH SPECT/CT IN NUCLEAR MEDICINE

*P.A. Korol, M.N. Tkachenko,
O.V. Shcherbina*

The review discusses the results of twenty years of experience using single-photon emission computed tomography/computed tomography (SPECT/CT). Hybrid imaging, including the use of SPECT in combination with CT, translates molecular and metabolic information directly onto the clinical effect of a wide range of diseases. At the same time, SPECT/CT further improve the diagnostic accuracy, specificity and positive prognostic value of nuclear medicine research. It was considered expedient to carry out a review of modern SPECT/CT applications, not only from the perspective of a diagnostic tool, but to integrate this modality into the clinical process. To this end, complex technological issues are being resolved for attracting new radiopharmaceuticals to use SPECT/CT, improving the quality of protocols for obtaining diagnostic images, quantifying them, as well as compiling protocols for dosimetry and radiation exposure that are beyond the scope of the current review.

Key words: single-photon emission computed tomography, hybrid imaging, nuclear medicine, radiopharmaceutical.