

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Український журнал клінічної хірургії. 2026 Липень/Серпень; 93(4):87-93
DOI: 10.26779/2786-832X.2026.4.87

Вимірювально-обчислювальна система інфрачервоної спектрально-теплової візуалізації та ідентифікації сторонніх тіл немагнітної щільності у біологічних об'єктах на моделі in vitro

Ю. В. Іванова¹, Б. Б. Бандурян², К. В. М'ясоєдов¹, І. А. Криворучко¹, С. А. Андрєєщев³

¹Харківський національний медичний університет,

²Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України, м. Харків,

³Національний науковий центр хірургії та трансплантології імені О. О. Шалімова НАМН України, м. Київ

Реферат

Мета. Розробка й апробація способу реєстрації температури з високою просторовою роздільною здатністю при дослідженні спектрів рівноважного власного інфрачервоного випромінювання сторонніх тіл у біологічних об'єктах in vitro.

Матеріали і методи. Розроблено спектрально-аналітичну установку для реєстрації спектрального розподілу потужності інфрачервоного випромінювання з використанням матриці у фокальній площині (Focal Plane Array) форматом 480 × 640 елементів. Досліджено електро- та теплофізичні, оптичні та інфрачервоні спектральні властивості зразків монокристалів оксиду алюмінію (Al_2O_3) і діоксиду титану (TiO_2) діаметром 15 мм та товщиною 0,8 мм у діапазоні довжин хвиль 7,5 – 14 мкм. У моделі in vitro зразки занурювали у м'язову тканину свині на глибину 5 см. Для формування термоконтрасту використовували надвисокочастотну стимуляцію контрольованої потужності та тривалості з подальшою реєстрацією інтегральних і диференціальних інфрачервоних сигналів.

Результати. Створена система забезпечила візуалізацію спектральних складових інфрачервоного випромінювання та реєстрацію термоконтрасту, пов'язаного з наявністю модельних сторонніх тіл у біологічній тканині. Для зразків Al_2O_3 і TiO_2 встановлено відмінності спектральних характеристик у діапазоні довжин хвиль 7,5 – 14 мкм, що дає підстави для того, щоб розглядати можливість їх матеріалозалежної диференціації. В експериментальній моделі продемонстровано принципову можливість виявлення неферомагнітних сторонніх тіл у товщі м'язової тканини після короточасної надвисокочастотної стимуляції. Розрахунково-експериментально підтверджено досяжність спектральної роздільної здатності до 0,01 cm^{-1} , миттєвого кута зору близько 0,0001 рад, поля зору до 0,5 рад і температурної чутливості близько 0,05 К.

Висновки. Запропонований додатковий метод візуалізації та ідентифікації немагнітних низькорентгеноконтрастних сторонніх тіл у біологічній тканині перспективний. Отримані результати мають характер Proof-of-Concept (перевірка концепції) та потребують подальшої валідації у розширених експериментальних дослідженнях і дослідженнях in vivo.

Ключові слова: неруйнівний контроль; активна інфрачервона термографія; візуалізація дефектів; інфрачервоне сканування; біологічні тканини; сторонні тіла; експеримент.

У ХХІ столітті структура бойової травми суттєво змінилася, що безпосередньо пов'язано з трансформацією факторів ураження. В умовах сучасної війни в Україні значну частку поранень спричиняють не лише «класичні» металеві уламки, а й компоненти сучасних боеприпасів, включаючи полімери, композити, текстильні матеріали й інші немагнітні фрагменти. Проблема сторонніх тіл у ранах залишається однією з ключових у сучасній хірургії, особливо в умовах бойової травми, яка за характером ушкоджень значно відрізняється від цивільної. Окрему проблему становлять сторонні тіла немагнітної щільності, які не-

можливо візуалізувати за допомогою стандартної рентгенографії. До них належать деревина, пластмаса, гума, текстиль, а також різноманітні органічні речовини. В умовах сучасних бойових дій, коли широко застосовуються імпровізовані вибухові пристрої та полімерні конструкції, частота таких поранень значно зросла, що обумовлює актуальність проблеми як із діагностичної, так і з лікувальної точки зору [1].

Кількість поранених через бойові дії в Україні та ускладнення, пов'язані з наявністю у м'яких тканинах металевих уламків, каміння, пластику, скла, деревини, спонукать

ють дослідників до пошуку універсального методу візуалізації цих сторонніх тіл із подальшим їх видаленням [2].

На полі бою військовослужбовці найчастіше отримують множинні поранення, спричинені фрагментами вибухового пристрою (62%), артилерійськими снарядами, обстрілами з мінометів, коли пошкоджуються декілька анатомічних ділянок. Із середини 2023 року для ураження почали активно застосовувати FPV-дрони, з того часу частота таких поранень тільки зростає, що ще більше загострило проблему візуалізації сторонніх феромагнітних тіл у м'яких тканинах та їх видалення [2].

Фізико-біологічні властивості феромагнітних сторонніх тіл значною мірою визначають їх поведінку в організмі. На відміну від феромагнітних сторонніх тіл, які добре візуалізуються та часто інертні, органічні та полімерні матеріали можуть мати складну структуру, здатну взаємодіяти з тканинами. Полімерні матеріали, хоча і вважаються відносно інертними, здатні викликати хронічне асептичне запалення, а також слугувати субстратом для формування біоплівки. Усе це призводить до високого ризику діагностичних помилок, особливо в умовах обмежених часу і ресурсу, що характерно для ранніх етапів медичної евакуації [1, 2].

Патолофізіологічні процеси, що розвиваються у відповідь на наявність стороннього тіла, багатофазні. У гострій фазі домінує запальна реакція з активацією нейтрофілів, вивільненням прозапальних цитокінів (інтерлейкін-1 та фактор некрозу пухлин-альфа) і розвитком локального набряку. Якщо стороннє тіло не видалено, процес переходить у хронічну фазу, яка характеризується залученням макрофагів, формуванням гігантських клітин та розвитком гранульоматозної тканини. Організм намагається ізолювати чужорідний матеріал шляхом формування фіброзної капсули, однак цей процес не завжди ефективний, особливо коли сторонні тіла інфіковані або пористі.

Як на важливому патогенетичному механізмі слід наголосити на формуванні біоплівки, які являють собою мікробні спільноти, здатні прикріплюватися до поверхні стороннього тіла, та значно знижують ефективність антибактеріальної терапії, оскільки бактерії у їх складі мають підвищену резистентність до антимікробних препаратів і захищені від імунної відповіді організму. Це пояснює високу частоту хронічних інфекцій та рецидивних абсцесів у пацієнтів із невидаленими сторонніми тілами [3].

Радіологічна щільність як ключовий фізичний параметр, який визначає можливість візуалізації сторонніх тіл при використанні променевих методів діагностики, відображає здатність матеріалу поглинати або послаблювати іонізуюче випромінювання. Саме цей показник лежить в основі диференціації тканин і сторонніх тіл під час комп'ютерної томографії (КТ). У клінічній практиці це означає, що феромагнітне стороннє тіло може «маскуватися» під різні анатомічні структури залежно від часу, що минув після поранення, та умов у рані. Полімерні та композитні матеріали, які широко використовуються в сучасних боеприпасах, мають ще більш різноманітні ра-

діологічні характеристики. Скловолокно, пластмаса високої щільності та гумові компоненти можуть мати проміжні значення радіологічної щільності, що ускладнює їх диференціацію навіть у разі використання КТ. Чутливість методів, що базуються на рентгенівському випромінюванні, зокрема рентгенографії і КТ, безпосередньо залежить від різних значень щільності. Якщо ця різниця недостатня, чутливість методу значно знижується. Саме тому рентгенографія практично неефективна для виявлення радіолюцентних сторонніх тіл [4, 5].

Загальний підхід до лікування вогнепальних поранень полягає у дебридменті ран та видаленні феромагнітних сторонніх тіл із використанням магнітного інструментарію та електронно-оптичних перетворювачів. Але видалення потребують і феромагнітні сторонні тіла: уламки металеві (алюмінієві, мідні), бетонні, скляні, пластикові тощо.

Відомо, що термографія – один з основних методів неруйнівного контролю якості матеріалів та виробів [6]. У теперішній час термографічна діагностика та інфрачервоний (ІЧ) спектральний аналіз визнані високотехнологічною областю прикладних досліджень, що об'єднує досягнення у візуалізації дефектів і їхніх параметрів. Основою експериментальної бази для отримання цієї інформації слугують тепловізори та ІЧ спектрометри. Температура як кількісний показник внутрішньої енергії тіл є універсальною характеристикою будь-якого об'єкта. Аналізуючи теплові процеси, отримують повну інформацію про стан органічних і неорганічних об'єктів [6]. Так, вимірювати і контролювати температуру необхідно, використовуючи надвисокочастотну (НВЧ) гіпертермію в хірургії [7].

Револьюційними в розвитку термографії стали успіхи в розробці пристроїв для візуалізації теплових полів. Високочутливий ІЧ радіометр дозволяє отримати великий обсяг інформації, який необхідно формалізувати, оцінити за критеріями якості, систематизувати для вирішення конкретних завдань [8, 9].

Рівень доступу до цієї інформації визначається температурою джерела ІЧ випромінювання, чутливістю, рівнем вимірювально-обчислювальної системи, програмним забезпеченням. Особливе значення ці обставини мають для досліджень *in vivo*.

Таким чином, сторонні тіла немагнітної щільності як характерна особливість сучасних бойових поранень становлять суттєву проблему для хірургів. Їх складно візуалізувати, їм притаманні висока біологічна активність та здатність спричиняти хронічні ускладнення, тому вони потребують застосування сучасних діагностичних підходів та індивідуалізованої тактики лікування. Без урахування особливостей сучасної зброї та механізмів травм неможливо підвищити ефективність медичної допомоги пораненим. Саме тому методика ІЧ термометрії перспективна в діагностиці сторонніх тіл у біологічних об'єктах.

Мета дослідження: розробка й апробація способу реєстрації температури з високою просторовою роздільною здатністю при дослідженні спектрів рівноважного влас-

ного інфрачервоного випромінювання сторонніх тіл у біологічних об'єктах *in vitro*.

Матеріали і методи дослідження

Для вивчення градієнтів температури у м'яких тканинах, що містили сторонні предмети, під впливом НВЧ випромінювання різної потужності і тривалості була створена на базі ІЧ спектрометра ІЧС–21 і тепловізора LAND–814 [7] спектрально – аналітична установка, в якій для реєстрації спектрального розподілу потужності ІЧ випромінювання використана матриця у фокальній площині (Focal Plane Array – FPA) форматом 480×640 елементів (рис. 1, 2). Це дозволило покращити чутливість, спектральну роздільну здатність і, що головне, візуалізувати спектральні складові ІЧ випромінювання [10].

Слід зазначити, що плоске поворотне дзеркало (див. рис. 2, 13) дозволяло порівнювати результати вимірювань від одиночного приймача випромінювання (18) з повномасштабною матрицею (16) для узгодження розрахованих і експериментальних співвідношень і визначення характеристик розробленого пристрою.

У дослідженні використано біологічний матеріал тваринного походження (м'язову тканину свині) в моделі *in vitro*. Дослідження не передбачало залучення людей або живих тварин. У роботі вивчено електро– та теплофізич-

ні, оптичні, ІЧ спектральні (7,5 – 14 мкм) властивості зразків монокристалів оксиду алюмінію (Al_2O_3) і діоксиду титану (TiO_2) діаметром 15 мм і товщиною 0,8 мм (рис. 3) за методикою пресування таблеток із бромідом калію з наступним пресуванням суміші [11].



Рис.1.
Диспергуючий ІЧ спектрометр з просторово-частотною роздільною здатністю.

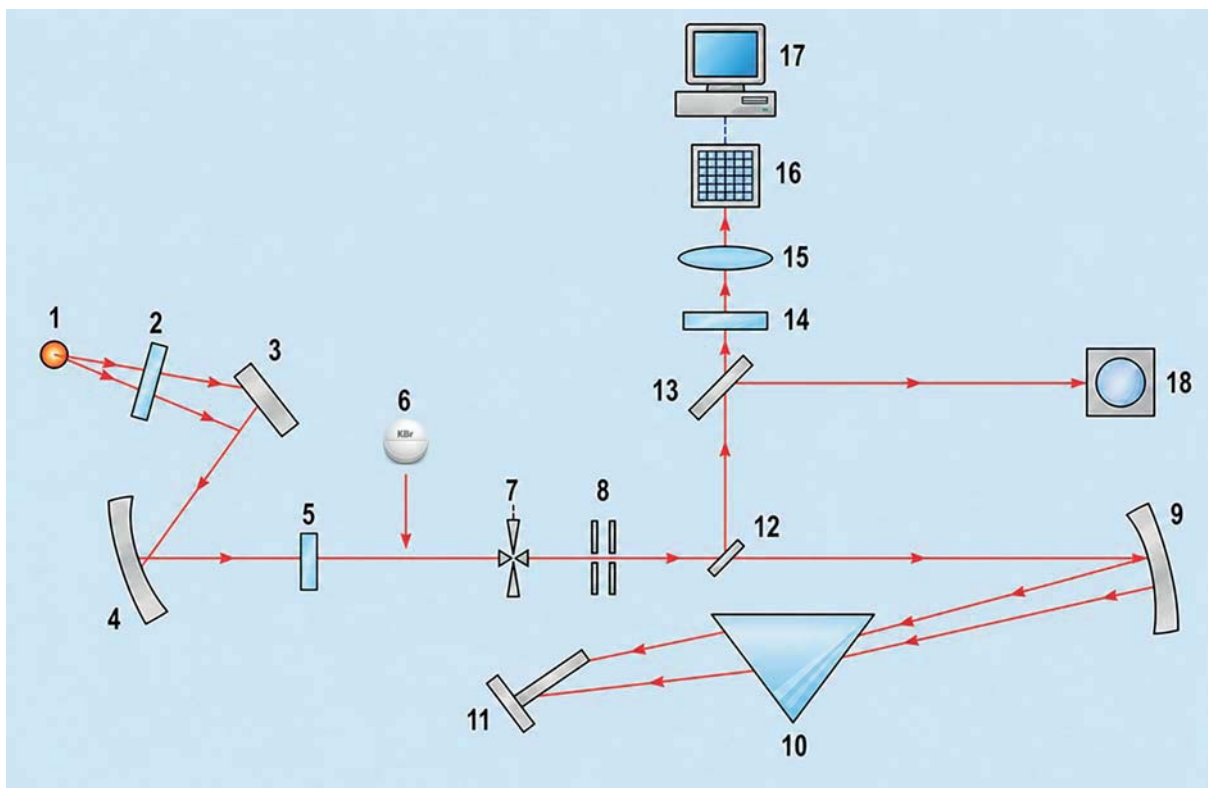


Рис. 2.

Оптична схема спектрально-аналітичної установки:

- 1 - глобар (джерело ІЧ випромінювання); 2 - вхідне захисне вікно освітлювача; 3 - плоске дзеркало; 4 - сферичне дзеркало; 5 - вихідне захисне вікно освітлювача; 6 - газова або рідинна кювета; 7 - діафрагма; 8 - вхідна щілина; 9 - позаосьове параболічне дзеркало; 10 - призма; 11 - дзеркало Літтрова; 12 - плоске дзеркало; 13 - плоске поворотне дзеркало; 14 - вихідне захисне вікно монохроматора або фільтр; 15 - оптична система радіометра; 16 - повномасштабна матриця FPA «дивлячого типу»; 17 - блок обробки результатів вимірювань; 18 - одиночний приймач випромінювання.



Рис. 3.
Зразки монокристалів Al_2O_3 і TiO_2 .

У ході експерименту *in vitro* зразки занурювали у м'язову тканину свині на глибину 5 см. Як надвисокочастотний генератор використовували стандартний медичний апарат ЛУЧ-3 із частотою 2,45 ГГц. Оптичне дослідження в найбільш інформативному спектральному діапазоні (7,5 – 14 мкм) проводили за допомогою розробленої спектрально-аналітичної установки.

Основними кінцевими точками дослідження були: візуалізація оптичної щільності модельних зразків; реєстрація їх спектральних інфрачервоних характеристик; якісна візуалізація зразків у товщі м'язової тканини після надвисокочастотної стимуляції; оцінка основних параметрів розробленої вимірювально-обчислювальної системи.

Результати

Установлено, що зразки Al_2O_3 і TiO_2 мали відмінні оптичні та спектральні характеристики в межах обраного ІЧ діапазону. Реєстрація сигналів оптичної щільності дозволила отримати візуалізовані зображення для кожного зразка та встановити наявність матеріалозалежних особливостей ІЧ відгуку (рис. 4, 5).

Спектральними вимірюваннями у діапазоні 7,5 – 14 мкм для неопромінених зразків Al_2O_3 і TiO_2 було виявлено відмінності розподілу ІЧ пропускання, що свідчило

про можливість спектрального розрізнення досліджуваних матеріалів і створювало передумови для їх ідентифікації за спектрально-тепловими ознаками (рис. 6, 7).

В експерименті *in vitro* після занурення зразків у м'язову тканину свині на глибину 5 см та короткочасного надвисокочастотного впливу було отримано термоконтрастні зображення, які підтвердили принципову можливість візуалізації неферромагнітних сторонніх тіл у біологічному середовищі (рис. 8). Поєднання інтегрального ІЧ зображення та аналізу спектральних складових підвищувало інформативність реєстрації.

За розрахованими співвідношеннями, підтвердженими експериментально, оцінено потенційні характеристики системи: спектральна роздільна здатність до 0,01 cm^{-1} , миттєвий кут зору близько 0,0001 рад, поле зору до 0,5 рад. Використання об'єктива, виготовленого з германію та просвітленого в діапазоні 7,5 – 14 мкм, забезпечувало очікувану температурну чутливість на рівні близько 0,05 К.

Реалізація такого пристрою відкриє доступ до якісно нових обсягів інформації.

Обговорення

Отримані результати підтвердили принципову можливість застосування ІЧ спектрально-теплової візуалізації для виявлення сторонніх тіл немагнітної низькорентгеноконтрастної щільності у біологічних тканинах за контрольованих експериментальних умов. На відміну від стандартної рентгенографії, ефективність якої суттєво залежить від рентгенологічної щільності об'єкта, запропонований підхід базується на аналізі локальних теплових градієнтів і спектральних особливостей випромінювання [12 – 14].

Отримані дані узгоджуються з літературними повідомленнями про ультразвукове дослідження (УЗД) як високочутливий метод для виявлення радіолюцентних сторонніх тіл, особливо при їх поверхневому розташуванні, тоді як КТ забезпечує кращі анатомічну локалізацію

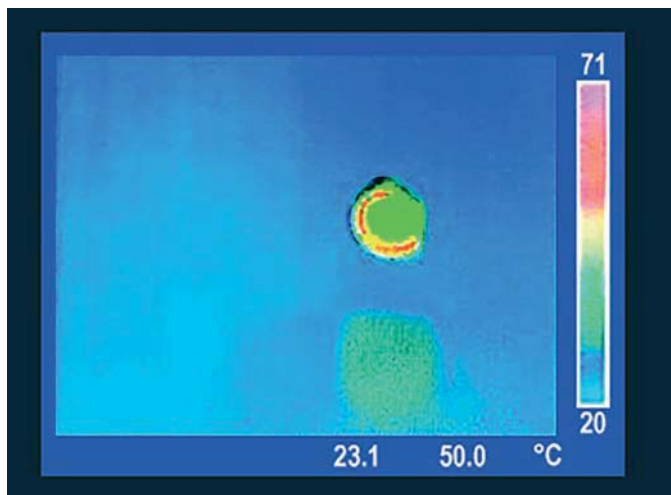


Рис. 4.
Візуалізований сигнал оптичної щільності зразка Al_2O_3 .

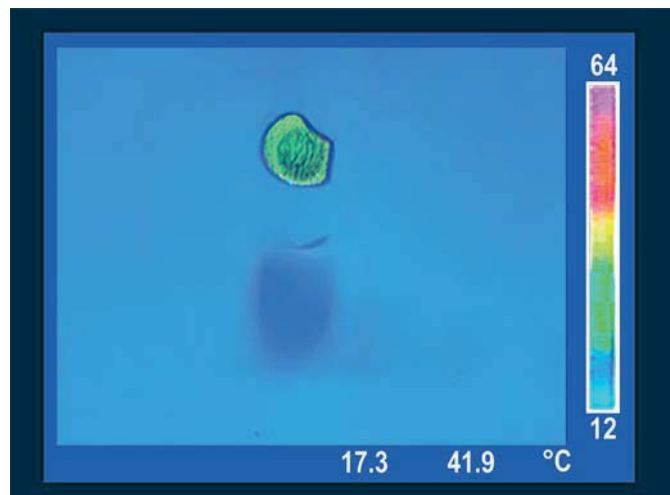


Рис. 5.
Візуалізований сигнал оптичної щільності зразка TiO_2 .

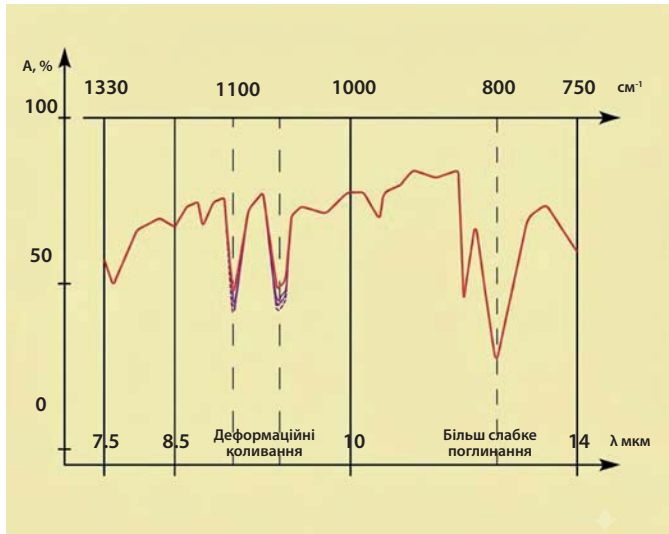


Рис. 6.

Графік спектрального розподілу ІЧ пропускання неопроміненого зразка Al_2O_3 в діапазоні довжини хвиль 7,5 - 14 мкм.

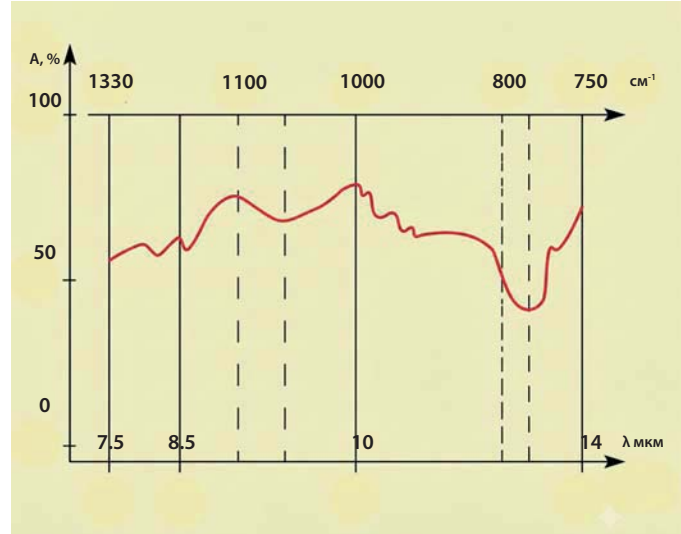


Рис. 7.

Графік спектрального розподілу ІЧ пропускання неопроміненого зразка TiO_2 в діапазоні довжини хвиль 7,5 - 14 мкм.

та оцінку взаємовідношень із навколишніми структурами [13, 15 – 19]. Це означає, що запропонований підхід доцільно розглядати не як альтернативу вказаним методам, а як потенційний додатковий інструмент, здатний формувати новий тип контрасту в системі «стороннє тіло – біологічна тканина».

На окрему увагу заслуговують сторонні тіла збройного походження та інші неметалеві фрагменти, що можуть бути слабкоконтрастними при стандартній рентгенологічній візуалізації. Для таких об'єктів УЗД, як свідчать дані експериментальних і клінічних досліджень [20 – 22], залишається важливим методом їх виявлення, особливо якщо вони локалізуються доступно для ультразвукового сканування. У цьому контексті спектрально-теплова візуалізація може розглядатися як допоміжний напрямок подальшого розвитку медичних технологій для роботи з немагнітними фрагментами.

Із позицій сучасної медичної термографії запропонований підхід доцільно розглядати не як заміну УЗД або КТ, а як потенційний допоміжний інструмент, здатний забезпечити новий тип контрасту – температурно-спектральний. Це відповідає сучасному баченню ролі ІЧ термографії в медицині як підтримувальної, неінвазивної та радіаційно безпечної технології, інформативність якої залежить від стандартизованих умов вимірювання та коректного аналітичного опрацювання [23 – 25].

Водночас це дослідження має низку обмежень. По-перше, воно виконане *in vitro* на спрощеній біологічній моделі з використанням м'язової тканини свині. По-друге, досліджено лише два модельні матеріали. По-третє, робота має переважно техніко-експериментальний характер і не містить кількісної оцінки діагностичної чутливості, специфічності чи прямого порівняння з УЗД і КТ в єдиному протоколі. По-четверте, клінічна застосовність методу потребує окремої перевірки в умовах *in vivo* з ураху-

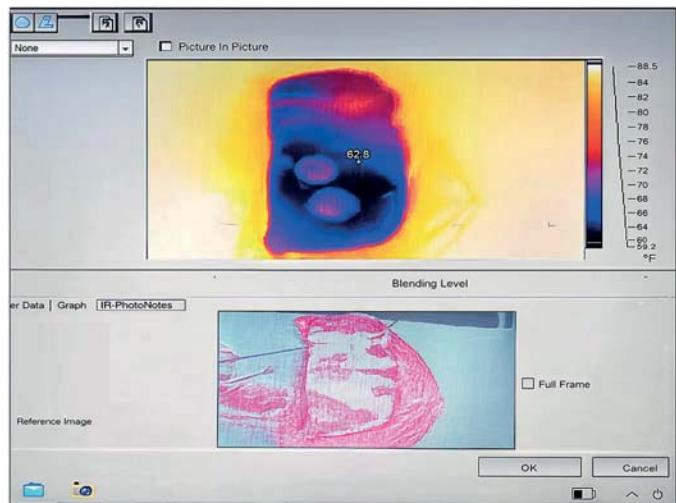


Рис. 8.

Приклад візуалізації зразків монокристалів AlO_3 та TiO_2 , розміщених у м'язовій тканині свині на глибині 5 см, при впливі надвисокочастотного випромінювання з частотою 2,45 МГц і потужністю 5 W протягом 1 с.

ванням перфузії тканин, рухових артефактів, неоднорідності анатомічних структур та вимог біобезпеки.

Таким чином, розроблена система може розглядатися як перспективна експериментальна платформа для подальших досліджень у напрямку спектрально-теплової діагностики сторонніх тіл у біологічних середовищах.

Висновки

1. Розроблено та апробовано експериментальний зразок вимірювально-обчислювальної системи ІЧ спектрально-теплової візуалізації сторонніх тіл у біологічних тканинах.

2. У діапазоні 7,5 – 14 мкм продемонстровано принципову можливість інтегральної та диференціальної візуалі-

зації немагнітних низькорентгеноконтрастних сторонніх тіл у м'язовій тканині на моделі *in vitro*.

3. Для зразків Al_2O_3 і TiO_2 встановлено відмінності ІЧ спектральних характеристик, що свідчить про потенційну можливість їх матеріалозалежної ідентифікації.

4. Запропонований підхід перспективний як додатковий метод діагностики, однак потребує подальшої експериментальної та клінічної валідації.

Фінансування. Зовнішні джерела фінансування і підтримки не залучалися. Гонорари або інші компенсації не виплачувалися.

Внесок авторів. Усі автори брали участь у розробці концепції та плану дослідження, підготовці матеріалів, зборі та аналізі даних. Перший варіант рукопису був написаний усіма авторами. Усі автори ознайомилися з остаточним варіантом рукопису та затвердили його.

Конфлікт інтересів. Авторів заявили, що у них немає конфлікту інтересів або фінансових зобов'язань.

Доступність даних та матеріалів. Дані надаються за запитом.

Заяви

Етичне схвалення та згода на участь у дослідженні. Питання про проведення дослідження було розглянуто та схвалено комітетом з етики Інституту загальної та невідкладної хірургії імені В. Т. Зайцева (протокол № 26 від 23 грудня 2025 року).

Права людини або захист тварин. Усі процедури в дослідженні виконані відповідно до Гельсінської декларації 1964 року.

Використання генеративного штучного інтелекту в наукових працях. Під час підготовки цієї роботи для корекції та покращення якості ілюстрацій використано нейромережі Nana–Banana 2.0 та ReveAI 2.0. Після автоматичної обробки автори особисто перевірили та затвердили фінальний вигляд усіх графічних матеріалів. Штучний інтелект не використовували для створення, аналізу або інтерпретації наукових даних.

References

1. Tsybaliuk VI, editor. Gunshot Wounds to Soft Tissues (Experience from the Anti-Terrorist Operation/Joint Forces Operation). Kharkiv: Collegium; 2020. 400 p. Ukrainian. ISBN: 978-966-97655-7-4.
2. Nehoduiko V, Tsema Ie, Humenyuk K, Kravchenko K, Yurkiv O, Dubenko D, et al. Bilateral Gunshot Wounds to the Chest at Different Levels of Medical Care. J Educ Health Sport. 2021;11(4):92-100. doi:0.12775/JEHS.2021.11.04.010.
3. Oswald-Tranta B. Inductive thermography – review of a non-destructive inspection technique for surface crack detection. Quantitative InfraRed Thermography Journal. 2025;22(5):478-502. doi: 10.1080/17686733.2024.2448049.
4. Tuschl C, Oswald-Tranta B, Agathocleous T, Eck S. Scanning inductive pulse phase thermography with changing scanning speed for non-destructive testing. Quantitative InfraRed Thermography Journal. 2024;21(3):156-71. doi: 10.1080/17686733.2023.2170159.
5. Wilson J, Tian GY, Abidin IZ, Yang S, Almond D. Modelling and evaluation of eddy current stimulated thermography. Nondestructive Testing and Evaluation. 2010;25(3):205-18.
6. Oswald-Tranta B. Induction thermography for surface crack detection and depth determination. Appl Sci (Switz). 2018;8(2):257. doi: 10.3390/app8020257.
7. IvanovaYV, Bandurian BB, Myasoedov KV, Kryvoruchko IA, Andreieshev SA. Detection and identification of foreign objects by infrared scanning: literature review and own research. Ukr J Clin Surg. 2025 May/June; 92(3):26-33. doi: 10.26779/2786-832X.2025.3.26.
8. Oswald-Tranta B. Inductive thermography – review of a non-destructive inspection technique for surface crack detection. Quant Infrared Thermogr J. 2025;22(5):478–502. doi: 10.1080/17686733.2024.2448049.
9. Tuschl C, Oswald-Tranta B, Agathocleous T, Eck S. Scanning inductive pulse phase thermography with changing scanning speed for non-destructive testing. Quant Infrared Thermogr J. 2024;21(3):156-71. doi: 10.1080/17686733.2023.2170159.
10. Sizov FF. Photoelectronics for Vision Systems in the "Invisible" Regions of the Spectrum. Kyiv: Akademperiodyka; 2008. 460 p. Russian. ISBN: 978-966-360-089-5.
11. Didovets Y, Koloskov V, Bandurian B, Koloskova H. Method of Investigation of Soil Contamination with Heavy Metals at the Sites of Explosions. Key Engineering Materials. 2024;988:107-16. doi: 10.4028/p-n9oeAe.
12. Ginsburg MJ, Ellis GL, Flom LL. Detection of soft-tissue foreign bodies by plain radiography, xerography, computed tomography, and ultrasonography. Ann Emerg Med. 1990 Jun;19(6):701-3. doi: 10.1016/s0196-0644(05)82483-7. PMID: 2188542.
13. Ingraham CR, Mannelli L, Robinson JD, Linnau KF. Radiology of foreign bodies: how do we image them? Emerg Radiol. 2015 Aug;22(4):425-30. doi: 10.1007/s10140-015-1294-9. PMID: 25648360.
14. Voss JO, Maier C, Wüster J, Beck-Broichsitter B, Ebker T, Vater J, et al. Imaging foreign bodies in head and neck trauma: a pictorial review. Insights Imaging. 2021 Feb 15;12(1):20. doi: 10.1186/s13244-021-00969-9. PMID: 33587198.
15. Horton LK, Jacobson JA, Powell A, Fessell DP, Hayes CW. Sonography and radiography of soft-tissue foreign bodies. AJR Am J Roentgenol. 2001 May;176(5):1155-9. doi: 10.2214/ajr.176.5.1761155. PMID: 11312171.
16. Mohammadi A, Ghasemi-Rad M, Khodabakhsh M. Non-opaque soft tissue foreign body: sonographic findings. BMC Med Imaging. 2011 Apr 10;11:9. doi: 10.1186/1471-2342-11-9. PMID: 21477360.
17. Tahmasebi M, Zareizadeh H, Motamedfar A. Accuracy of ultrasonography in detecting radiolucent soft-tissue foreign bodies. Indian J Radiol Imaging. 2014 Apr;24(2):196-200. PMID: 25024533.
18. Lorenz KJ, Böckers A, Fassnacht U, Wilde F, Wegener M. Implementation of a miniaturised navigation system in head and neck surgery for the detection and removal of foreign bodies. Eur Arch Otorhinolaryngol. 2017 Jan;274(1):553-9. doi: 10.1007/s00405-016-4212-1. PMID: 27430225.
19. Grocutt H, Davies R, Heales C. Ultrasound compared with projection radiography for the detection of soft tissue foreign bodies - A technical note. Radiography (Lond). 2023 Oct;29(6):1007-10. doi: 10.1016/j.radi.2023.08.005. PMID: 37666114.
20. Tantray MD, Rather A, Manaan Q, Andleeb I, Mohammad M, Gull Y. Role of ultrasound in detection of radiolucent foreign bodies in extremities. Strategies Trauma Limb Reconstr. 2018 Aug;13(2):81-5. doi: 10.1007/s11751-018-0308-z. Epub 2018 Feb 9. PMID: 29426979.
21. Harcke HT, Levy AD, Lonergan GJ. The sonographic appearance and detectability of nonopaque and semiopaque materials of military origin. Mil Med. 2002 Jun;167(6):459-63. PMID: 12099079.
22. Graham DD Jr. Ultrasound in the emergency department: detection of wooden foreign bodies in the soft tissues. J Emerg Med. 2002 Jan;22(1):75-9. doi: 10.1016/s0736-4679(01)00440-1. PMID: 11809560.
23. Ioannou S. Functional Infrared Thermal Imaging: A Contemporary Tool in Soft Tissue Screening. Sci Rep. 2020 Jun 9;10(1):9303. doi: 10.1038/s41598-020-66397-9. PMID: 32518287.

24. Kesztyüs D, Brucher S, Wilson C, Kesztyüs T. Use of Infrared Thermography in Medical Diagnosis, Screening, and Disease Monitoring: A Scoping Review. *Medicina (Kaunas)*. 2023 Dec 9;59(12):2139. doi: 10.3390/medicina59122139. PMID: 38138242.
25. Schiavon G, Capone G, Frize M, Zaffagnini S, Candrian C, Filardo G. Infrared Thermography for the Evaluation of Inflammatory and Degenerative Joint Diseases: A Systematic Review. *Cartilage*. 2021 Dec;13(2_suppl):1790S-1801S. doi: 10.1177/19476035211063862. PMID: 34933442.
26. Roggio F, Petrigna L, Filetti V, Vitale E, Rapisarda V, Musumeci G. Infrared thermography for the evaluation of adolescent and juvenile idiopathic scoliosis: A systematic review. *J Therm Biol*. 2023 Apr;113:103524. doi: 10.1016/j.jtherbio.2023.103524. PMID: 37055128.

Отримано 15 травня 2026
Рецензовано 03 червня 2026
Прийнято до друку 28 червня 2026
Опубліковано в Інтернеті 21 серпня 2026