

*М. О. Чиж*¹ <https://orcid.org/0000-0003-0085-296X>
*Г. О. Ковальов*¹ <https://orcid.org/0000-0002-5714-6698>
*Г. В. Шустакова*² <https://orcid.org/0000-0002-8737-0359>
*Ю. В. Фоменко*² <https://orcid.org/0000-0003-3108-8431>
*Е. Ю. Гордієнко*² <https://orcid.org/0000-0002-8692-8605>

МЕТОДИКА ТЕПЛОВІЗІЙНОГО КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ НА ШКІРІ ПРИ КРІОАБЛЯЦІЇ

¹Інститут проблем кріобіології і кріомедицини Національної академії наук України, Харків, Україна
²Фізико-технічний інститут низьких температур імені Б. І. Веркина Національної академії наук України, Харків, Україна

УДК 612.79:57.086.13:621.384.3

М. О. Чиж¹, Г. О. Ковальов¹, Г. В. Шустакова², Ю. В. Фоменко², Е. Ю. Гордієнко²
МЕТОДИКА ТЕПЛОВІЗІЙНОГО КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ НА ШКІРІ ПРИ КРІОАБЛЯЦІЇ

¹Інститут проблем кріобіології і кріомедицини Національної академії наук України, Харків, Україна

²Фізико-технічний інститут низьких температур імені Б. І. Веркина Національної академії наук України, Харків, Україна

Одним із неінвазивних дистанційних методів інтраопераційного контролю температурного поля є інфрачервона термографія, що реєструє динаміку теплових полів. Мета роботи – розробка тепловізійної методики моніторингу динаміки теплових полів на шкірі у разі короткочасного низькотемпературного впливу квазіточковим кріоаплікатором. За результатами тепловізійних досліджень розроблено методику моніторингу динаміки температурних полів на шкірі у разі низькотемпературного впливу. В роботі описані вимоги до умов тепловізійного обстеження, приведені необхідні технічні параметри обладнання, а також представлено детальний покроковий опис проведення вимірів і кількісного аналізу отриманих результатів.

Ключові слова: інфрачервона термографія, шкіра, кріохірургія, динаміка температурних полів.

UDC 612.79:57.086.13:621.384.3

М. О. Chyzh, H. O. Kovalov, H. V. Shustakova, Yu. V. Fomenko, E. Yu. Gordiyenko

THE PROCEDURE OF THERMAL IMAGING CONTROL OF THE TEMPERATURE FIELDS ON THE SKIN DURING CRYOABLATION

Introduction. In the treatment of malignant skin diseases using the cryosurgical method, the radicality of cryoablation is primarily used, which ensures the patient's recovery and reduces the likelihood of disease recurrence. One of the non-invasive remote methods of intraoperative control of the temperature field is infrared thermography, which records the dynamics of thermal fields that reflect the distribution and activity of internal processes in tissues. **The work aims** to develop a thermal imaging technique for monitoring the dynamics of thermal fields on the skin during short-term low-temperature exposure with a quasi-point cryoapplicator. **Materials and methods.** The technique is based on remote measurement of the intensity of temperature fields on the surface of the skin, finding abnormal areas of these fields and quantitative assessment of the parameters of abnormal areas and their dynamics. Cryodestruction of the skin and underlying tissues was carried out with a quasi-point cryoapplicator cooled by liquid nitrogen, and thermal imaging examination was carried out with an original infrared camera, specially designed for studies of the dynamics of low-temperature thermal fields. **Results and discussion.** Based on the results of thermal imaging studies, a method of monitoring the dynamics of temperature fields on the skin during low-temperature exposure with a quasi-point cryoapplicator has been developed. The work describes the requirements for thermal imaging inspection conditions, provides the necessary technical parameters of the equipment, and also presents a detailed step-by-step description of the measurements and quantitative analysis of the obtained results. **Conclusions.** The methodology can become the basis for developing an appropriate "clinical protocol", the implementation of which in clinical practice will contribute to the improvement of the quality of treatment of patients by increasing the accuracy of diagnosis, prevention of complications and relapses.

Key words: infrared thermography, skin, cryosurgery, dynamics of temperature fields.

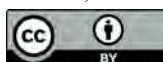
Кріодеструкція новоутворень шкіри широко застосовується в дерматології. Під час лікування більше 80 нозологічних форм використовують низькі температури, в тому числі в терапії деяких злоякісних пухлин – базальноклітинних та плоскоклітинних карцином та меланом [1–3]. На перший план у лікуванні злоякісних захворювань шкіри кріохірургічним методом виступає радикальність кріоабляції, що сприяє зменшенню вірогідності появи рецидиву захворювання та є запорукою одужання пацієнта. Обов'язковим етапом у хірургічному лікуванні хворих є планування операції, що включає визначення точних розмірів і форми злоякісного новоутворення за допомогою таких методів

клінічної візуалізації, як УЗД, КТ та МРТ, для окреслення меж кріовпливу з мінімально необхідним захватом ділянки здорових тканин навколо пухлини. Також цей етап включає біопсію тканин – для оцінки температури первинного некрозу, яка залежить від гістологічної природи пухлини, і вибір кріогенної техніки для проведення оперативного втручання [4; 5].

На другому етапі лікування – під час проведення кріохірургічних операцій – ключовим питанням є контроль динаміки температури тканин у зоні кріодеструкції. Хірургам досить складно прогнозувати межі кріонекрозу з метою максимального руйнування патологічно-змінних тканин без зайвої деструкції навколишніх здорових тканин, оскільки наявні клінічні рекомендації щодо кріовпливу не враховують стан шкіри, судинної системи підшкірно-жирової клітковини, локалізації пухлини (наприклад, поблизу великої судини) та інших індивідуальних особливостей пацієнта.

© М. О. Чиж, Г. О. Ковальов, Г. В. Шустакова та ін., 2023

Стаття поширюється на умовах ліцензії



Інтраопераційний контроль повинен включати як моніторинг руху фронту заморожування, для чого в основному використовується УЗД [1; 5], так і оцінку динаміки температурного поля всередині замороженої зони для контролю миттєвого положення некротичної ізотерми.

На сьогодні загальноприйнятим методом вимірювання температури в біологічних тканинах є контактна термометрія з використанням термопар [3]. Проте застосування контактних термопар повністю не вирішує проблеми контролю температур у зоні кріодеструкції, тому що дозволяє вимірювати температуру лише в окремій точці, а збільшення кількості термопар значно підвищує інвазивність маніпуляції та ризик інфікування. Крім того, неправильно введена термопара в процесі охолодження може дати значну помилку [6], що може призвести до переоцінки розмірів летальної зони і, відповідно, неповної деструкції пухлинної тканини, а наявність проводів термопар в операційному полі ускладнює роботу хірурга.

Тому викликають велику цікавість неінвазивні дистанційні методи інтраопераційного контролю температурного поля [7; 8]. Одним із таких методів є інфрачервона термографія (ІЧТ), що реєструє динаміку теплових полів на поверхні шкіри, які відображають розподіл і активність внутрішніх процесів у підлягаючих тканинах [9]. Обсяг енергії, що випромінюється з поверхні шкіри, безпосередньо залежить від активності кровообігу і інтенсивності метаболізму в тканинах [3].

Для отримання достовірної інформації про внутрішні процеси, які відбуваються в м'яких тканинах, необхідно правильно провести виміри параметрів температурного поля на поверхні шкіри, врахувати вплив навколишнього середовища та інших побічних факторів, а також коректно провести кількісний аналіз цих параметрів та їх змін у часі [10]. Для вирішення цих завдань потрібні відповідні тепловізійні методики, які містять послідовність дій та прийомів проведення тепловізійного обстеження та аналізу отриманих даних. Але на сьогодні не існує стандартів дистанційного вимірювання температурних полів на поверхні шкіри живих об'єктів та кількісної обробки температурних даних. Це є однією із серйозних причин, які обмежують використання унікального неінвазивного термографічного методу в клінічних умовах.

Мета роботи – розробка методики тепловізійного моніторингу динаміки теплових полів на шкірі у разі короткочасного низькотемпературного впливу квазіточковим кріоаплікатором.

Матеріали та методи дослідження. Методика ґрунтується на дистанційному вимірюванні інтенсивності температурних полів на поверхні шкіри, знаходженні аномальних ділянок цих полів і кількісній оцінці параметрів аномальних ділянок та їх динаміки. Методика базується на експериментальних дослідженнях, проведених авторами [11–13], і розроблена за результатами статистичного аналізу отриманих даних. Ці дослідження ґрунтуються на припущенні напівсферичної форми замороженої зони з радіальним розподілом температури та нехтуванні екзотермічними реакціями в тканинах у разі швидкісного та короткочасного

(до 2 хв.) заморожування тканин. Кріодеструкція шкіри і підлеглих тканин здійснювалася квазіточковим кріоаплікатором, що охолоджувався рідким азотом, а тепловоїзійне обстеження – оригінальною інфрачервонною камерою, спеціально розробленою для досліджень динаміки низькотемпературних теплових полів [12].

Результати та їх обговорення.

Методика тепловізійного контролю динаміки температурних полів на шкірі у разі короткочасного низькотемпературного впливу квазіточковим азотним кріоаплікатором in vivo

Призначення

– На передопераційному етапі (етап планування). Методика може бути використана для допоміжної топічної діагностики пухлин м'яких тканин до проведення кріовпливу.

– На інтраопераційному етапі (етап низькотемпературного впливу та нагрівання). Методика може бути використана для контролю динаміки теплових полів на поверхні шкіри, у тому числі моніторингу у реальному часі розмірів та форми ізотерми кромки льоду ($T \approx 0^\circ\text{C}$) та некротичної ізотерми у разі швидкого та короткочасного (до 2 хвилини) охолодження азотним квазіточковим кріоаплікатором.

– На постопераційному етапі (етап одужання). Методика може бути використана для кількісного моніторингу активності загальнопатологічних процесів, виявлення ускладнень ранового процесу, рецидивів пухлини тощо після проведення кріовпливу будь-яким інструментом та параметрами режиму.

– На постклінічному етапі (етап амбулаторний). Методика може бути використана для періодичного контролю теплових полів шкіри у зоні оперативного втручання задля профілактики можливих ускладнень або рецидивів.

1. Вимоги до апаратури та устаткування

Вимірювання теплових полів на шкірі (термографічне обстеження) має проводитися тепловізійною системою, що відповідає вимогам до медичного устаткування згідно з ДСТУ EN 80601-2-59:2015 «Додаткові вимоги щодо безпеки та основних робочих характеристик термографів для скринінгу фебрильної температури тіла людини» [14].

Технічні параметри тепловізора, який може бути використано, мають бути не гірші за параметри, наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Технічні параметри тепловізора

Параметри	Показник
Спектральний діапазон, мкм	8–14
Формат зображення, точок, не менш	256 x 256
Температурна чутливість, °C (при 30°C), не більше	0.1
Час кадру, с, не більше	1
Діапазон температур, що вимірюються, °C, не менш	+50...–30
Похибка виміру абсолютної температури, °C (при +30°C), не більш	±0.6
Похибка виміру абсолютної температури, °C (при – 30°C), не більш	±1.0

Багато, щоб за конструкцією тепловізор був мобільним, компактним, з можливістю автономного живлення і закріплення на штативі. Для безпосереднього спостереження на моніторі динаміки теплового поля у реальному часі тепловізор повинен мати вбудований екран або поєднуватися з ПК з можливістю запису на електронний носій окремого файлу (термограми), або масиву послідовних кадрів (термографічного фільму).

Програмне забезпечення (ПЗ) повинне мати зручний набір функцій для керування роботою приладу, забезпечуючи:

- візуалізацію теплового зображення об'єктів у реальному часі;
- автоматичну або ручну настройку фокусу;
- можливість змінювати коефіцієнт випромінювання;
- індикацію абсолютної температури в будь-якій точці теплового зображення;
- зміну активної кольорової палітри;
- ручне або автоматичне керування яскравістю та контрастністю зображення;
- збереження окремих термограм або динамічного фільму на носії інформації;
- швидкий перегляд збережених термограм.

Для подальшого кількісного аналізу теплових зображень ПЗ повинне мати зручний набір функцій, у тому числі:

- можливість зміни коефіцієнта випромінювання;
- можливість вибору різних кольірних палітр;
- автоматичну або ручну установку динамічного діапазону;
- вимір абсолютної температури в будь-якій точці зображення;
- побудову термопрофілів у будь-якій позиції;
- побудову ізотерм;
- маркування і визначення площі ділянки, температура якої більша (менша, дорівнює) заданої;
- автоматичне визначення максимальної, середньої і мінімальної температур виділеного фрагменту.

Із додаткової апаратури і матеріалів, що використовуються під час проведення термографічного обстеження, необхідні: термометр кліматичний для виміру температури повітря у приміщенні з чутливістю $0,1^{\circ}\text{C}$ (типу BEURER HM16); імітатор моделі абсолютно чорного тіла (АЧТ) для поточного тестування тепловізора (наприклад, мідна пластина, покрита сажею, на затиску з відомим коефіцієнтом випромінювання); контактний термометр з чутливістю $0,1^{\circ}\text{C}$ (типу TESTO 905 – T2), закріплений на поверхні АЧТ; штатив для фіксації тепловізора (типу ARSENAL 3750) та фотоапарат (або інший прилад) для отримання фото ділянки інтересу. Фото дозволяє виключити з аналізу ділянки гіпо/гіпертермії, викликані шрамами, родимками та іншими особливостями шкіри, не пов'язаними з патологічним ураженням, що досліджується.

2. Підготовка до вимірів

Термографічне обстеження (крім сесії під час операції) проводять у спеціальному приміщенні (кабінет термографії), що відповідає таким вимогам:

- розмір приміщення не менш 20 м^2 ;
- температура повітря в приміщенні $22\dots 24^{\circ}\text{C}$.

– коефіцієнт випромінювання стін не менш ніж $0,93$ (штукатурка або масляна фарба будь-якого кольору);

– відсутність прямого сонячного випромінювання та джерел тепла або холоду (обігрівачі, кондиціонери тощо).

Термографічне обстеження проводять за стаціонарного температурного режиму, який контролюють виміром у центрі приміщення температури повітря. Режим вважається стаціонарним, якщо упродовж обстеження температура повітря не змінилася в межах чутливості термометра.

Перед термографічним обстеженням пацієнту пропонується посидіти в довільній позі впродовж 15 хвилин з повністю звільненими від одягу ділянкою інтересу та симетричною (контрольною) ділянкою. Під час проведення термографії тварини, що знаходиться у стані неспання, необхідно забезпечити час на її адаптацію до умов термографування, відповідно до видів та індивідуальних особливостей.

3. Проведення вимірів

Термографування проводять впродовж усього лікування через певні інтервали часу*, а саме (обов'язкові сесії):

– **сесія 0** (базова сесія) проводиться до низькотемпературного впливу з метою допоміжної топічної діагностики патологічних уражень м'яких тканин, а також для отримання базового теплового зображення ділянки інтересу для подальшого кількісного аналізу динаміки теплових полів у цій зоні;

– **сесія 1** (протягом низькотемпературного впливу та відігрівання) проводиться з метою контролю динаміки теплових полів на поверхні шкіри, у тому числі моніторингу у реальному часі розмірів та форми ізотермі кромки льоду та некротичної ізотермі;

– **сесії 2...n** (за потребою, наприклад, раз на добу*) проводяться з метою кількісного моніторингу активності загальнопатологічних процесів під час подальшого лікування; частота цих тепловізійних сесій залежить від особливостей перебігу процесу одужання (наявності ускладнень ранового процесу, виявлених рецидивів новоутворень тощо).

*Завдяки тому, що тепловізійне обстеження є цілком безпечним, сесії можна здійснювати так часто, як це потрібно.

Постклінічні тепловізійні сесії проводяться з інтервалом, що визначається відповідно до особливостей випадку.

3.1. Проведення вимірів (сесії 0, 2...n).

На тепловізійних сесіях (0, 2...n) пропонується така послідовність проведення вимірів:

- Вимірюють температуру повітря в центрі приміщення кліматичним термометром.
- Тепловізор вмикають і настраюють відповідно до інструкції з експлуатації.
- У зоні проведення термографії закріплюють модель АЧТ.
- Вимірюють температуру поверхні АЧТ контактним термометром.
- Роблять тестування тепловізора, порівнюючи значення радіаційної температури поверхні АЧТ, що виміряна тепловізором, з вимірами контактного термометра.

– Тепловізор встановлюють на штатив на такій відстані від пацієнта або піддослідної тварини, щоб у полі зору повністю помістилися ділянка інтересу та контрольна ділянка.

– Вибирають зручну палітру.

– Проводять автоматичне або ручне фокусування.

– Отримують і запам'ятовують на карті пам'яті декілька термограм.

– У тому ж ракурсі роблять декілька фото у видимому діапазоні.

Файли термограм, що зберігаються в електронному архіві, несуть повну інформацію про просторовий розподіл теплового поля.

Подальші виміри теплових полів пацієнтів або піддослідних тварин проводять з тієї ж відстані та у тому ж ракурсі впродовж усього курсу лікування.

Після вимірів базової сесії проводять аналіз отриманих термограм, уточнюючи зону майбутнього кріовпливу. Для цього використовують результати передопераційних досліджень іншими методами клінічної візуалізації (КТ, МРТ, УЗД) з визначення форми та об'ємних розмірів ураження (наприклад, новоутворення). Також використовують результати гістологічного дослідження з виявлення типу патологічної тканини для отримання значення $T_{\text{нec}}$ – температури первинного некрозу для такого типу тканини.

Керуючись цими результатами, позначають на термограмі кордон зони майбутнього первинного некрозу (некротичну ізотерму з температурою $T_{\text{нec}}$) у вигляді кола такого діаметра $D_{\text{нec}}$ щоб, по-перше, перекривало всю проекцію утворення на шкіру, і по-друге, його радіус був не менший за максимальну глибину утворення. За потреби додають запас +2...5 мм, відповідно до конкретної клінічної ситуації. Позначають центр кола (точку дотику центру кріоінструмента).

3.2. Проведення вимірів (сесія 1).

Ця тепловізійна сесія проводиться безпосередньо під час кріохірургічної операції. Позначають на шкірі некротичну ізотерму та її центр. (Малюнок на шкірі рисують антисептичним розчином, який буде видно в інфрачервоному діапазоні через різницю коефіцієнтів випромінювання шкіри і розчину).

Після вимірювання температури повітря і тестування параметрів тепловізора (див. п. 3.1) виконують такі кроки:

– На моніторі отримують теплове зображення зони інтересу з окресленою на шкірі некротичною ізотермою.

– Встановлюють курсор на будь-яку точку на ізотермі, яка не буде загороджуватися кріоінструментом під час операції.

– За хвилину до початку кріовпливу починають автоматичний запис термографічного фільму (якщо є така опція) або записують термограми вручну з вибраною частотою.

– Одночасно протягом кріовпливу на моніторі контролюють поточне значення температури.

– Кріовплив припиняють, як тільки температура у вибраній точці досягне заданого значення температури первинного некрозу для такого типу тканини $T_{\text{нec}}$.

Якщо значення некротичної температури такого

типу тканин нижче за мінімальну температуру, яка може бути виміряна тепловізором, $T_{\text{нec}} < -30^{\circ}\text{C}$ (що є можливим для деяких злоякісних новоутворень шкіри), навколо кола некротичної ізотерми відзначаємо коло ізотерми кромки льоду, діаметр якої D_{cr} співвідноситься до діаметра некротичної ізотерми як $D_{\text{cr}} \approx 1.6 D_{\text{нec}}$ для такого режиму кріовпливу [17]. У цьому випадку встановлюємо курсор на ізотерму кромки льоду і припиняємо кріовплив у разі досягнення у точці курсору кріоскопічної температури такого типу тканин ($T_{\text{cr}} \approx 0^{\circ}\text{C}$).

4. Кількісний аналіз термограм

4.1. Аналіз термограм, отриманих на базовій сесії 0.

Кількісний аналіз базових термограм проводять до початку лікування з метою допоміжної топічної діагностики патологічного утворення для уточнення плану кріооперації, а також для отримання базових параметрів, які використовують для аналізу динаміки подальших процесів.

Обробку базових термограм здійснюють за допомогою функцій інтерфейсу користувача програмного забезпечення тепловізора, що використовується.

З електронного архіву завантажують файл з базовою термограмою. За допомогою відповідних функцій програмного забезпечення встановлюють палітру кольору, яскравість, температурний діапазон теплового зображення, виходячи зі зручності сприйняття.

Якщо на термограмі в ділянці патології спостерігається ділянка гіпер-/гіпотермії (рис. 1), її оцінюють за критерієм порушення теплової симетрії (різниці середніх температур досліджуваної зони інтересу T_{ai} (area of interest) і середніх температур симетричної контрольної ділянки такої ж форми і розміру T_{ref}). Для цього на термограмі проводять ось симетрії, виділяють ділянку інтересу та контрольну ділянку, розраховують програмно середню температуру кожної ділянки та обчислюють їх різницю $\Delta(T_{\text{ai}})_0$ (температура ділянки інтересу у відносній шкалі температур на базовій сесії 0, або показник теплової асиметрії):

$$\Delta(T_{\text{ai}})_0 = (T_{\text{ai}})_0 - (T_{\text{ref}})_0, \quad (1)$$

$\Delta(T_{\text{ai}})_0 > 0$ може свідчити про наявність злоякісного новоутворення або запального процесу в ділянці інтересу, $\Delta(T_{\text{ai}})_0 < 0$ – про порушення кровообігу, некроз тканин тощо.

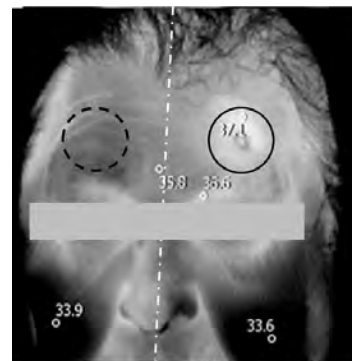


Рис. 1. Приклад первинної топічної діагностики патологічних новоутворень шкіри за критерієм порушення теплової симетрії (базова сесія). Діагноз: Плоскоклітинний рак шкіри чола зліва $T_3N_0M_0$

На рис. 1 наведено приклад аналізу термограми за критерієм порушення теплової симетрії (базова сесія). На термограмі суцільним колом окреслена ділянка інтересу із середньою температурою $T_{ai} = 36,7^{\circ}\text{C}$ і штрих-пунктирним колом – симетрична контрольна (здорова) ділянка лоба із середньою температурою $T_{ref} = 34,5^{\circ}\text{C}$. Тобто тепла асиметрія відповідно (1) дорівнює $\Delta(T_{ai})_0 = 2,2^{\circ}\text{C}$.

Таким чином, користуючись результатами базової сесії, здійснюють допоміжну топічну діагностику новоутворень/уражень. Теплове зображення патологічного утворення м'яких тканин більше його видимої ділянки, позаяк містить тепловий відбиток на шкірі його внутрішньої частини. Це дозволяє уточнити дійсний розмір ураження, включаючи підшкірні відгалуження, а також зони некрозу, порушення кровообігу, запалення тощо, які оточують видиму частину ураження і не виявляються методами МРТ, КТ та УЗД. Таким чином, тепловізійна топічна діагностика дає можливість уточнити зону кріохірургічного втручання і тактику операції.

Якщо на термограмі спостерігається ділянка гіпер-/гіпотермії, а контрольну ділянку за критерієм теплової асиметрії вибрати неможливо (наприклад, ділянка інтересу поблизу осі симетрії), вибирають як контрольну ділянку довільної форми і розміру у межах здорових тканин і порівнюють температуру ділянки інтересу із середньою температурою у контрольній області [15].

Якщо ділянка інтересу розташована поблизу осі симетрії, контрольну ділянку можна вибрати також у прилеглих здорових тканинах, але не ближче ніж 3 см від межі наявного або можливого запального процесу.

4.2. Аналіз термограм, отриманих на сесії 1.

Метою є отримання кількісної інформації про динаміку температурних полів у ділянці інтересу та у будь-якій точці поверхні об'єкта протягом кріовпливу, відтавання та подальшого відігрівання.

Аналіз серії послідовних термограм (термографічного фільму) здійснюють за допомогою функцій інтерфейсу користувача програмного забезпечення тепловізора, що використовується, причому кожен кадр фільму являє собою окрему термограму, яку кількісно аналізують, як було описано вище. Кожна така термограма зафіксована у певний момент циклу охолодження/відігрівання тканин, тому містить інформацію про динаміку температурних полів у ділянці інтересу та у контрольній ділянці. На рис. 2 наведено приклад отримання інформації про просторові та часові зміни розподілу температури на поверхні шкіри через функцію «температурний профіль» [13]. Профілі (рис. 2) є результатом аналізу термограм, записаних через 1, 4 та 25 с після припинення кріовпливу тривалістю 1 хв. На вставці наведено термограму (через 4 с) з відзначеними на ній контрольною ділянкою (пунктирне коло) та термопрофілем (стрілка), на вставці праворуч – збільшене теплове зображення зони кріоабляції через 1 с після припинення кріовпливу. Ці дані отримано з використанням спеціального тепловізора з розширеним діапазоном температур, що вимірюються.

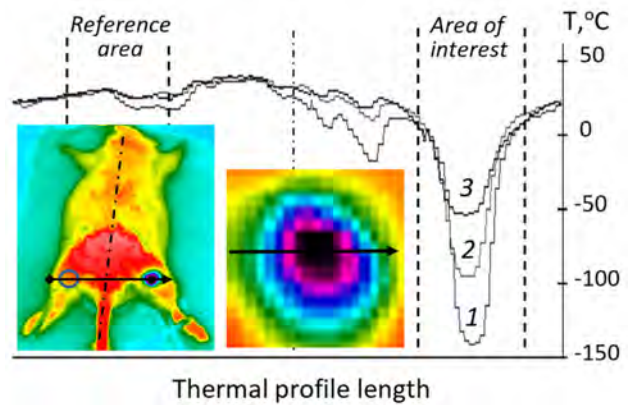


Рис. 2. Температурні профілі через ділянку інтересу (кріовпливу) та контрольну ділянку через 1 с (1), 4 с (2) та 25 с (3) після припинення кріовпливу тривалістю 1 хв. На вставці – термограма з відзначеною контрольною ділянкою (коло) та вказаним стрілкою термопрофілем (ліворуч) і збільшене теплове зображення зони абляції через 1 с після припинення кріовпливу

4.3. Аналіз термограм, отриманих на сесіях 2...n.

Аналіз проводять з метою регулярного кількісного контролю післяопераційної активності загальнопатологічних процесів (від кріовпливу до клінічного одужання) та з метою виявлення можливих ускладнень, рецидиву новоутворень тощо (постклінічний період).

Після завантаження файлу з термограмою, отриманою на поточній сесії j , та встановлення палітри, яскравості і температурного діапазону теплового зображення (див. вище) виконують такі кроки:

- Відзначають на термограмі ті ж самі за формою і розмірами ділянку інтересу та контрольну ділянку, що були відзначені на базовій сесії.

- Вимірюють середні температури цих ділянок і обчислюють аналогічно (1) показник теплової асиметрії (або температуру ділянки інтересу у відносній шкалі температур $\Delta(T_{ai})_j$)

$$\Delta(T_{ai})_j = (T_{ai})_j - (T_{ref})_j \quad (2)$$

Обчислюють показник динаміки температури ділянки інтересу поточної сесії стосовно базової, як:

$$\delta(T_{ai})_j = \Delta(T_{ai})_j - \Delta(T_{ai})_0 \quad (3)$$

За значенням $\delta(T_{ai})_j$ та результатами інших методів клінічної візуалізації та клінічних показників роблять висновок про стан тканини в ділянці інтересу (наявність запалення, порушення кровообігу, некрозу, рецидиву новоутворення тощо). Процедуру повторюють на кожній сесії.

Висновки.

1. Представлена тепловізійна методика є вибудованою системою способів і прийомів, що дозволяють вирішувати конкретне завдання – моніторинг динаміки теплових полів на шкірі у разі короточасного (до 2 хв.) кріохірургічного лікування патологій м'яких тканин квазіточковим кріоаплікатором. Методика містить вимоги до обладнання, правила підготовки та проведення вимірювань, а також алгоритм кількісного аналізу отриманих даних, що дозволяє коректно виконувати багаторазове тепловізійне обстеження пацієнта або піддослідної тварини.

2. Методика дозволяє здійснювати: допоміжну тепліну діагностику уражень м'яких тканин; кількісну оцінку активності загальнопатологічних процесів, що виникають у разі уражень м'яких тканин; інтраопераційний моніторинг теплових полів шкіри, у тому числі моніторинг руху кромки та некротичної ізотерми; періодичний (у тому числі амбулаторний) контроль теплових полів шкіри в зоні оперативного втручання задля профілактики можливих ускладнень.

3. Методика може стати основою для розробки відповідного «клінічного протоколу», впровадження якого у клінічну практику сприятиме покращенню якості

лікування пацієнтів за рахунок підвищення точності діагностики, попередження ускладнень і рецидивів. Також можна очікувати зниження витрат на лікування пацієнтів через зменшення потреби у вартісному діагностичному обладнанні.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Робота виконана за підтримки гранту Національного фонду досліджень України «Тепловізійне дослідження м'яких тканин з термічною травмою та математичне моделювання процесів, що її супроводжують». Державний реєстраційний номер проекту: 0123U103506.

ЛІТЕРАТУРА

1. Abramovits W, Graham G, Har-Shai Ya, Strumia R. Dermatological cryosurgery and cryotherapy. London: Springer. 2016. 758 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6765-5>
2. Chyzh MO, Belochkina IV, Hladkykh FV. Cryosurgery and physical medicine in treatment of cancer. *Ukrainian journal of radiology and oncology*. 2021; 29(2): 127–149. Available from: <https://ukroj.com/index.php/journal/article/view/93>.
3. Zimmerman EE, Crawford P. Cutaneous cryosurgery. *Am. Fam. Physician*, 86 (2012) 1118–1124. Available from: <https://www.aafp.org/afp/2012/1215/p1118.html>.
4. Chizh NA. Endoscopic Cryosurgery. *Probl Cryobiol Cryomed* 2017; 27(1): 03–18. DOI: <https://doi.org/10.15407/cryo27.01.003>.
5. Pasquali P. Cryosurgery. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag; 2015. 315 p.
6. Hoffmann NE, Bischof JC. Cryosurgery of normal and tumor tissue in the dorsal skin flap chamber: Part I-thermal response, *J Biomech Eng*. 2001; 123: 301–9. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.1385838>.
7. Lutz NW, Bernard V. Contactless thermometry by MRI and MRS: advanced methods for thermotherapy and biomaterials. *iScience*. 2020; 23: e101561, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101561>.
8. Overduin CG, Fütterer JJ, Scheenen TWJ. 3D MR thermometry of frozen tissue: feasibility and accuracy during cryoablation at 3T. *J. Magn. Reson. Imag*. 2016; 44: 1572–1579. DOI: <https://doi.org/10.1002/jmri.25301>.
9. Diakides NA, Bronzino JD. Medical infrared imaging. New York: CRC Press; 2007. 448 p.
10. Kiporenko PV, Gordiyenko EYu, Fomenko YuV, Shustakova GV. The procedure for measurement of the human temperature field dynamics. *Ukrainian Metrological Journal*. 2018; 3: 62–6. DOI: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.3.2018.153131>.
11. Glushchuk NI, Gordiyenko EYu, Fomenko YuV, Shustakova GV, Miroshnichenko LG, Kolotilov NN. The Results of the Study of Human Anomalous Thermal Fields under Irradiation. *Sci Innov*. 2017; 13(2): 43–52. DOI: <https://doi.org/10.15407/scine13.02.043>.
12. Kovalov GO, Gordiyenko EYu, Fomenko YuV, Shustakova GV, Kiporenko PV, Olefirenko OO. Dynamics of freezing and warming of soft tissues with short-term effect on skin with cryoapplicator. *Probl Cryobiol Cryomed*. 2020; 30(4): 359–68. DOI: <https://doi.org/10.15407/cryo30.04.359>.
13. Kovalov GO, Shustakova GV, Gordiyenko EYu, Fomenko YuV, Glushchuk MI. Infrared thermal imaging controls freezing and warming in skin cryoablation. *Cryobiology*. 2021; 103: 32–8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cryobiol.2021.09.014>.
14. Вироби медичні електричні (1) Додаткові вимоги щодо безпеки та основних робочих характеристик термографів для скринінгу фебрильної температури тіла людини. ДСТУ EN 80601-2-59:2015. 2015. Available from: https://www.dls.gov.ua/wp-content/uploads/2020/02/16088-dn_20200120_117_dod_3.pdf.
15. Cohen EEW, Ahmed O, Kocherginsky M, Shustakova G, Kistner-Griffin E, Salama JK et al. Study of functional infrared imaging for early detection of mucositis in locally advanced head and neck cancer treated with chemoradiotherapy. *Oral oncol*. 2013; 49 (10): 1025–1031. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oraloncology.2013.07.009>.

Надійшла до редакції 14.11.2023 р.

Прийнята до друку 20.12.2023 р.

Електронна адреса для листування n.chizh@ukr.net