

Перший досвід застосування інфрачервоної термографії для оцінки життєздатності кісткової тканини при вогнепальних переломах кінцівок суглобової та навколосуглобової локалізації

Хорошун Е. М.^{1,2}, Панасенко С.І.^{1,3}, Клатчук Ю.В.^{1,2}✉, Негодуйко В.В.^{1,2}

Вступ. Інфрачервона термографія (ІЧТ) широко використовується в ортопедії, травматології, в діагностиці та лікуванні судинних захворювань, діагностиці та оцінці формування запального процесу [12]. Сучасні наукові джерела інформації не містять робіт, присвячених питанням визначення життєздатності кісткової тканини при бойовій травмі шляхом ІЧТ; вони переважно орієнтовані на оцінку перфузії та меж некрозу м'якотканинних ушкоджень, а також на раннє виявлення інфекційного запалення [2, 7, 9, 12]. **Мета.** Оцінити діагностичну спроможність ІЧТ, як методу інтраопераційного визначення життєздатності кісткової тканини при навколосуглобових вогнепальних переломах із наявними кістковими та м'якотканинними дефектами. **Матеріали та методи.** Сформовано вибірку з 10 клінічних випадків вогнепальних багатоуламкових переломів навколосуглобової локалізації з формуванням первинного дефекту кістки і м'яких тканин. Термографію проводили за допомогою портативної камери FLIR C5 (FLIR Systems, USA). Для прогнозування життєздатності кісткового фрагмента брали до уваги центральну температуру, градієнт температур (ΔT), bleeding test та наявність холодних зон. **Результати.** За результатами дослідження, у 72% випадків ІЧТ дозволила диференціювати життєздатні ділянки кістки від аваскулярних фрагментів, що дало змогу зберегти кісткові структури та провести первинну пластику. У 28% випадків виявлено приховані зони некрозу ($\Delta T > 4,0^\circ\text{C}$), що стало підставою для обмеженої чи радикальної резекції нежиттєздатних уламків та дозволило уникнути розвитку хронічного остеомієліту у відтермінований період. **Висновки.** ІЧТ показала свою ефективність під час оцінки змін життєздатності кісткових фрагментів з часом. Перший досвід застосування інфрачервоної термографії для визначення життєздатності кісткової тканини при вогнепальних переломах навколосуглобової локалізації засвідчує підвищення ефективності інтраопераційного хірургічного планування об'єму оперативного втручання та обумовлює стійку тенденцію до покращення результатів лікування пацієнтів із складною бойовою травмою суглобів.

Ключові слова: бойова ортопедична травма, вогнепальний перелом кістки, поранення суглоба, інфрачервона термографія, «bleeding test», некроз кістки.

Вступ

Неспровокована агресія проти суверенної України та злочинні методи ведення війни супротивником поставили перед вітчизняною ортопедією і травматологією нові виклики, що характеризуються безпрецедентними кількісними і якісними показниками сучасної бойової хірургічної травми.

Негативна динаміка структури бойової ортопедичної травми останніх років характеризується збільшенням питомої ваги вогнепальних переломів з формуванням первинних дефектів кісток та численних кісткових фрагментів [10]. Подібна бойова ортопедична травма сама по собі має потенційно інвалідизуючий характер, проте об'єм кісткової тканини, що видаляється при хірургічній обробці, виступає вагомим чинником впливу на ступінь інвалідизації та може бути причиною ампутації кінцівки [5]. У цьому контексті пошук і розробка методів визначення життєздатності кісткової тканини для визначення об'єму її резекції при

✉ Клатчук Ю.В., klapchuks@gmail.com

¹ Військово-медичний клінічний центр Північного регіону КМС ЗС України, Україна, Харків

² Харківський національний медичний університет, Україна, Харків

³ Полтавський державний медичний університет, Україна, Полтава

хірургічній обробці вогнепальних переломів набуває актуального значення. Особливої ваги вона набуває при суглобових та навколосуглобових локалізаціях переломів, де збереження суглобової поверхні є важливим для досягнення конгруентності суглобу та раннього відновлення рухів задля покращення результатів лікування. Переважна більшість хірургів та травматологів під час прийняття рішення щодо резекції кістки орієнтуються лише на результатах клінічних даних без використання об'єктивних методів діагностики.

Одним із перспективних методів визначення життєздатності тканин при бойовій травмі є інфрачервона термографія (ІЧТ). Результати дослідження Sobko I.V. (2024) щодо застосування ІЧТ при бойовій травмі живота показали, що за характером термопрофілю можна виявляти нежиттєздатні тканини та межі некрозу паренхіматозних органів. Такий підхід дозволив оцінювати наявність кровопостачання в окремих ділянках тканин і органів, констатувати наявність мікроциркуляторних порушень та встановлювати межу резекції під час хірургічної обробки [11].

Інфрачервона термографія – це безконтактний метод вимірювання температури поверхні, що відображає стан локального кровообігу та пов'язаний з ним рівень теплообміну тканин. Вона широко використовується в судинній хірургії, ортопедії, травматології, діагностиці та оцінці формування запального процесу [12]. Наукові публікації присвячені визначенню життєздатності тканин при вогнепальних переломах у ділянці великих суглобів мають спорадичний характер. Окремі автори зазначають, що дані ІЧТ давали можливість виявити нежиттєздатні тканини, які підлягали видаленню та оцінити життєздатність переміщених клаптів після закриття дефектів м'яких тканин суглобових локалізацій [10]. Auf der Strasse W. та співавт. (2021) з'ясували, що зміни локальної температури тісно корелюють зі змінами кровопостачання, запаленням чи затримкою загоєння, і можуть доповнювати традиційні променеві методи діагностики під час спостереження за остеогенезом у процесі моніторингу загоєння тяжких переломів великогомілкової кістки [1].

Сучасні наукові джерела інформації не містять робіт, присвячених питанням визначення життєздатності кісткової тканини при бойовій травмі шляхом ІЧТ. Існуючі публікації фокусуються переважно на оцінці перфузії та меж некрозу м'якотканинних ушкоджень, а також застосуванні методу для раннього виявлення інфекційного запалення [2, 7, 9, 12].

Мета роботи: оцінити діагностичну спроможність ІЧТ як методу інтраопераційного визначен-

ня життєздатності кісткової тканини в ділянках суглобових і навколосуглобових вогнепальних переломів з наявними кістковими та м'якотканинними дефектами.

Матеріали і методи

Із загального дослідницького масиву сформовано вибірку з 10 клінічних випадків вогнепальних багатоуламкових переломів з проникненням у великі суглоби або навколосуглобовою локалізацією з формуванням первинного дефекту кістки і м'яких тканин. Всі пацієнти проходили лікування у травматологічному відділенні клініки ушкоджень ВМКЦ ПнР та були чоловічої статі, середній вік становив $38,2 \pm 3,2$ роки.

Критерії включення до дослідницької вибірки: наявний вогнепальний перелом суглобової та навколосуглобової локалізації з дефектом м'якої та кісткової структури верхньої та нижньої кінцівок. Критерії виключення: вогнепальний перелом суглобової та навколосуглобової локалізації без дефекту м'яких тканин, вогнепальний перелом на рівні діафіза верхньої та нижньої кінцівок, закриті переломи кінцівок.

Усі пацієнти попередньо отримували медичну допомогу на рівні Role 2 у регламентованому обсязі: мультимодальне знеболення, первинна хірургічна обробка (ПХО) ран з тимчасовим закриттям ранових дефектів стерильними пов'язками, фіксація ушкодженого суглоба стрижневим апаратом зовнішньої фіксації (АЗФ), профілактика ранової інфекції за допомогою антибактеріального препарату групи цефазоліну 1,0 г.

Надалі після стабілізації стану пацієнтів евакуювали на рівень Role 3. У ВМКЦ ПнР усі пацієнти проходили регламентоване комплексне фізикальне, клініко-лабораторне та інструментально-променеве ургентне обстеження і госпіталізувалися у профільне відділення відповідно до домінуючого ушкодження.

У плановому порядку всім пацієнтам, які мали проникаюче поранення ділянки великого суглоба, проводилися загальноклінічні та лабораторні методи дослідження, рентгенографія, спіральна комп'ютерна томографія (СКТ) для оцінки ступеня та характеру пошкодження кістки. Для класифікації кісткового дефекту навколосуглобової та суглобової локалізації використовували класифікацію кісткових дефектів Burianov O. та співавт. (2024) [3]. Дефекти м'яких тканин стратифікували за Ferreira N. і Tanwar Y. S. (2020) [4].

Після обстеження хворого в умовах операційної проводилася хірургічна обробка, під час якої

здійснювали ревізію рани, фасціотомію, туалет розчином декскетпрофену трометамолу та фізіологічним розчином згідно із сучасними настановами [6]. Після осушення кістки стерильними серветками проводили ІЧТ за допомогою портативного професійного тепловізора (термографа) FLIR C5 (FLIR Systems, USA). Це пристрій, який фіксує інфрачервоне випромінювання від об'єктів та перетворює його на видиме зображення, де різні кольори відповідають різним температурам. Дана модель має функцію MSX (Multi-Spectral Dynamic Imaging), тобто тепловізор накладає контури об'єктів зі звичайної камери на теплове зображення, що значно полегшує ідентифікацію окремих деталей під час обстеження. Дистанційну спектральну ІЧТ виконували у стандартних умовах при температурі приміщення 21-23 °С. Вимірювання здійснювали з відстані 20 см під кутом 90° до поверхні досліджуваної ділянки. Для аналізу використовували програмне забезпечення FLIR Tools із визначенням центральної температури зони кісткового уламку, мінімальної, максимальної температури в зоні інтересу (ROI) та температурний градієнт. Статистичну обробку проводили з використанням пакету SPSS 26.0.

Прийняття рішення стосовно резекції кістки, збереження чи видалення кісткового уламку проводилося комплексно на підставі аналізу даних клінічної картини, тесту на кровоточивість (bleeding test) та показників ІЧТ.

Результати та їх обговорення

Проведено 14 сеансів ІЧТ у 10 пацієнтів з використанням термографа Flir C5, при яких визначали наступні температурні параметри: центральна температура (зона кісткового уламка), максималь-

на температура, периферична температура, наявність чи відсутність гіпотермічних (холодових) зон та температурний градієнт.

Практичне виконання комплексної оцінки життєздатності кісткової тканини та інтерпретацію отриманих даних представлено наступними клінічними прикладами.

Пацієнт №1 (рис. 1) із вогнепальним переломом дистального метафізу великогомілкової кістки з формуванням кісткового дефекту класу В3. При ІЧТ центральна температура дистального уламку склала 33,0 °С, периферична – 34,6 °С. Температурний градієнт склав 1,6 °С. Холодові зони на термограмі відсутні.

Відносно підвищена температура у центрі свідчить про наявність локальної перфузії, активний метаболізм тканин та відсутність аваскулярного некрозу, що може вказувати на життєздатну зону із частково збереженим кровопостачанням. Перидефектна зона характеризувалася вищою температурою – 34,6 °С, що вказує на реактивну гіперемію та активний ангіогенез; це типово для репаративної фази та на нашу думку, є позитивним прогностичним маркером для кісткової реконструкції. Слід зазначити відсутність холодної «мертвої» зони, тобто чіткої гіпотермічної ділянки (<28–29 °С), що характерно для секвестру або повного некрозу. Враховуючи клінічні дані, позитивний bleeding test та термографічні показники, резекція кістки не проводилася, оскільки вона була розцінена як життєздатна. Надалі було проведено етапне хірургічне втручання: заміщення кісткового дефекту антибактеріальним цементним спейсером із пластикою дефекту м'яких тканин суральним клаптом.

Пацієнт №2 (рис. 2) із вогнепальним переломом верхньої третини діафіза лівої стегнової кістки та сегментарним кістковим дефектом. При ІЧТ відмічається центральна температура 22,2 °С, що

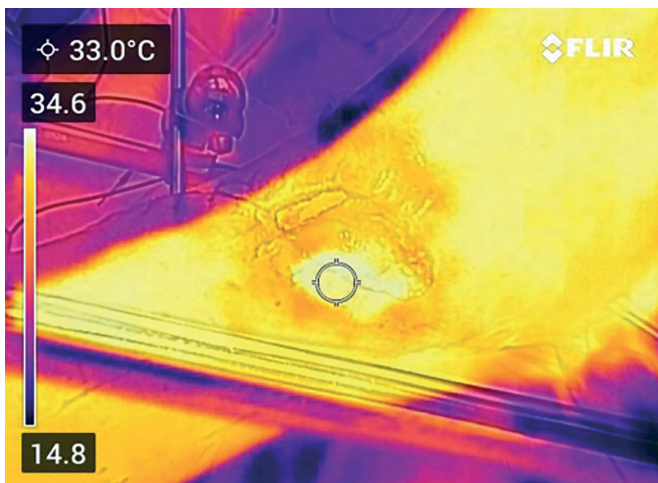


Рис. 1. Фототермограма (А) та фото (Б) дефекту м'яких тканин ділянки гомілково-стопного суглобу та кісткових структур дистального метафізу великогомілкової кістки правої гомілки.

характеризується слабкою термічною активністю та може бути проявом зниженого або критично порушеного кровопостачання. Це типово для ішемізованої кістки або початкових проявів аваскулярного некротичного процесу.

Наявна гіпотермічна ділянка (16–18 °C) темно-синього кольору характерна для критичного зниження мікроциркуляції, ймовірно формування некрозу та секвестрації. Ця ділянка з високою вірогідністю має підлягати резекції. Периферична гіпертермія (25–26 °C) вказує на збережену судинну реакцію та спроможність організму до регенерації. Враховуючи клінічні дані, негативний «bleeding test» та дані термографічного профілю, була проведена резекція краю дистального фрагменту стегнової кістки довжиною 3,8 см до появи позитивного «bleeding test». У подальшому проведено заміщення кісткового дефекту антибактеріальним цементним спейсером з фіксацією стрижневим АЗФ таз-стегно.

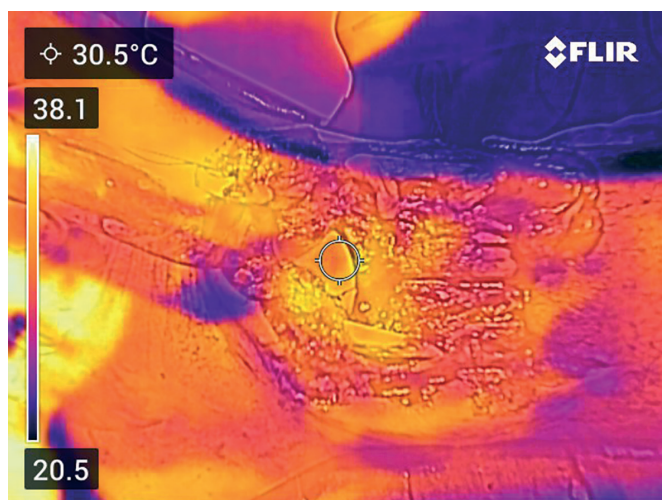


Рис. 2. Фототермограма (А) та фото (Б) дефекту м'яких тканин ділянки верхньої третини стегна та кісткових структур проксимального метадіафізу стегнової кістки.

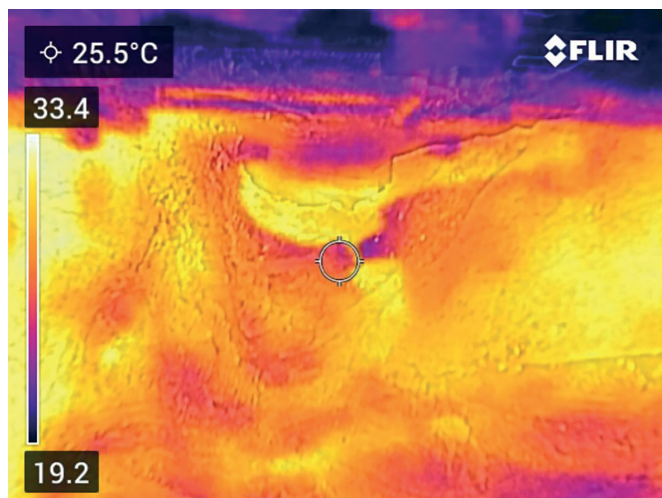
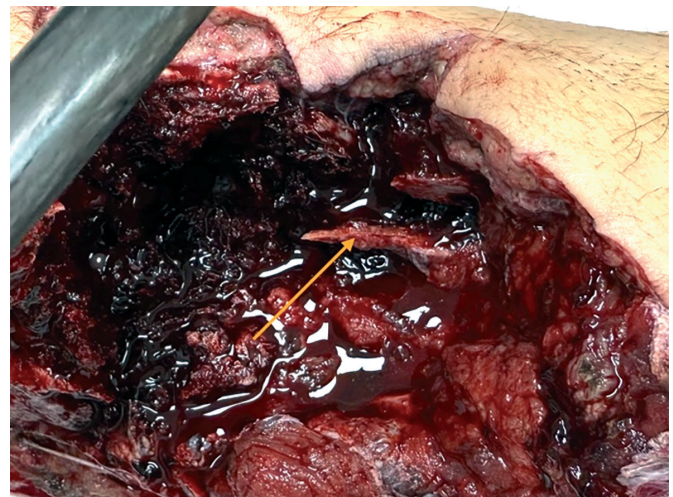
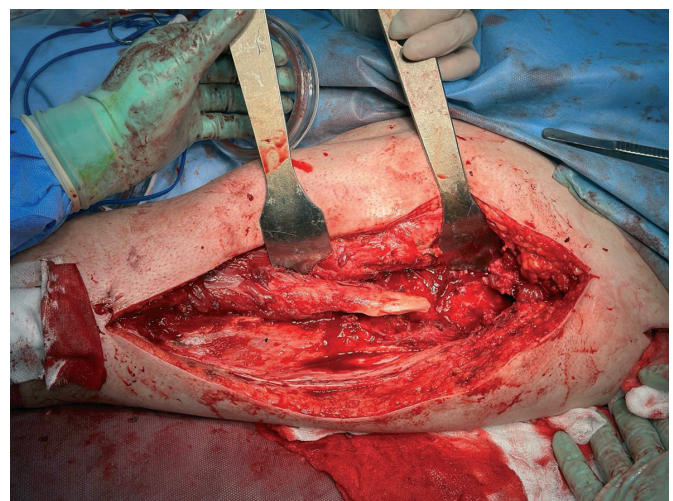


Рис. 3. Фототермограма (А) та фото (Б) дефекту м'яких тканин ділянки верхньої третини гомілки та кісткових структур проксимального метафізу великогомілкової кістки правої гомілки.

Пацієнт №3 (рис. 3) із вогнепальним внутрішньосуглобовим багатоуламковим переломом проксимального епіметадіафізу правої великогомілкової кістки та формуванням дефекту м'яких тканин і кісткової структури. Температура кісткового уламка склала 26,2 °C, і він має температурний градієнт 2,1°C, що відповідає ознакам збереженої або частково збереженої життєздатності. Враховуючи клінічні дані, позитивний «bleeding test» та дані термографічного профілю, резекція краю кісткового уламка великогомілкової кістки не проводилася.

Пацієнт №4 (рис. 4) із вогнепальним багатоуламковим переломом великогомілкової кістки правої гомілки в області верхньої та середньої третини з формуванням дефекту м'яких тканин та кісткової тканини. Температура центральної зони склала 31 °C з діапазоном 19,1–33,4 °C. Периферична температура 33 °C. Температурний градієнт 2 °C. Кістковий уламок демонструє відсутність чіткої холодної зони, що відповідає ознакам збереженої



або частково збереженої життєздатності. Враховуючи клінічні дані, позитивний «bleeding test» та дані термографічного профілю, резекція краю фрагменту кісткового уламку великогомілкової кістки не проводилася. У подальшому пацієнт був евакуйований на IV рівень надання медичної допомоги.

Пацієнт №5 (рис. 5.1, 5.2) із наскрізним пораненням лівого гомілково-стопного суглоба та стопи з уламковим переломом зовнішньої кісточки, крайовим переломом таранної та п'яткової кісток зі зміщенням, багатоуламковим переломом кубоподібної кістки та основи V плесневої кістки зі зміщенням, кістковими дефектами та масивним дефектом м'яких тканин передньо-зовнішньої поверхні гомілково-стопного суглоба. Проведено ІЧТ блока таранної кістки через 48 годин після поранення (рис. 5.1).

Згідно з даними термограми температура цент-

ральної зони склала 29,8 °С з діапазоном 34,6–21,8 °С. Відмічається помірне зниження температури центральної частини блоку таранної кістки. Температура периферії складає 33,8°С. Температурний градієнт – «центр-периферія» склав 4 градуси, що свідчить про порушення мікроциркуляції та високу ймовірність формування аваскулярного некрозу. Враховуючи отримані дані через 2 доби проведено повторну термографію таранної кістки для оцінки її життєздатності (рис. 5.2).

Згідно з даними термограми температура центральної зони склала 27,2 °С, що на 2,6° С менше, ніж два дні тому. Діапазон температур склав 34,6–17,7 °С. Тобто відмічається помірне зниження температури центральної частини блоку таранної кістки з 29,8 °С до 27,2 °С. Температура периферії складає 34,2 °С. Температурний градієнт склав 7 градусів. Зберігається типовий термографічний патерн ішемічного фрагменту з перифокальною

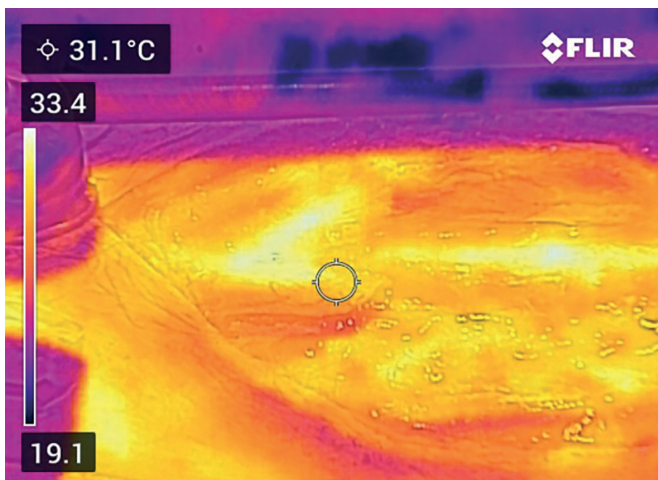


Рис. 4. Термограма (А) та фото (Б) дефекту м'яких тканин та кісткових структур верхньої третини правої гомілки.

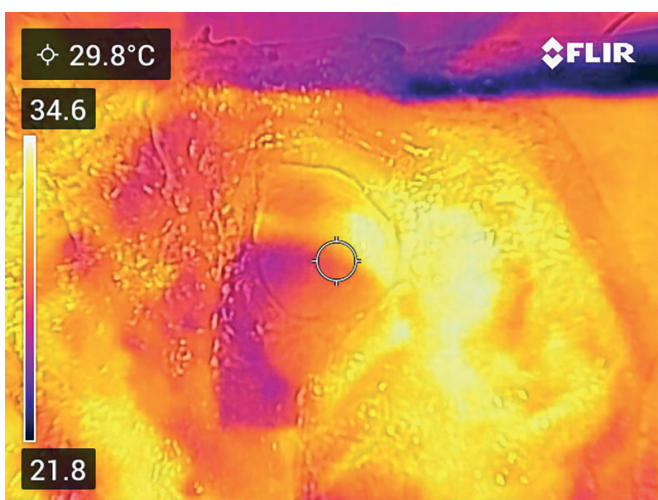


Рис. 5.1. Фототермограма (А) та фото (Б) дефекту м'яких тканин та кісткових структур лівого гомілково-стопного суглоба

реактивною гіперемією, що свідчить про значне порушення мікроциркуляції та високу ймовірність формування аваскулярного некрозу. Крім того, відмічається макроскопічне прогресування некрозу блоку таранної кістки у вигляді потемніння суглобового хряща, що свідчить про незворотні зміни. Для подальшого лікування пацієнт евакуйований на IV рівень надання медичної допомоги. Згодом пацієнту було проведено видалення частини нежиттєздатної таранної кістки на фоні прогресування її некрозу.

Пацієнт №6 (рис. 6.1, 6.2, 6.3) із вогнепальним проникаючим пораненням лівого ліктьового суглоба з багатоуламковим внутрішньо-суглобовим переломом нижньої третини плечової кістки, верхньої третини ліктьової кістки та голівки променевої кістки з масивним дефектом м'яких тканин і кісткової структури. Проведено ІЧТ ушкодженої голівки променевої кістки (рис. 6.1).

Згідно зі шкалою показників тепловізора максимальна температура – 35,2 °С, у центральній зоні вимірювання – 25,4 °С. Периферична зона – 33 °С. Температурний градієнт становить 7,6 °С, що є патологічним для життєздатних тканин. Центральна зона (чітка «холодна зона»), що свідчить про відсутність адекватної перфузії, порушення мікроциркуляції або некротичний процес. Спираючись на термографічні показники та негативний bleeding test проведено резекцію голівки променевої кістки з повторною термографією та порівняльним аналізом (рис. 6.2).

За даними тепловізора FLIR температура в центральній точці вимірювання (проксимальна ділянка променевої кістки після резекції) склала 29,7 °С. Максимальна температура поля: 34,7 °С, Мінімальна температура: 19,0 °С. Периферична зона – 33 °С. Температурний градієнт між зоною

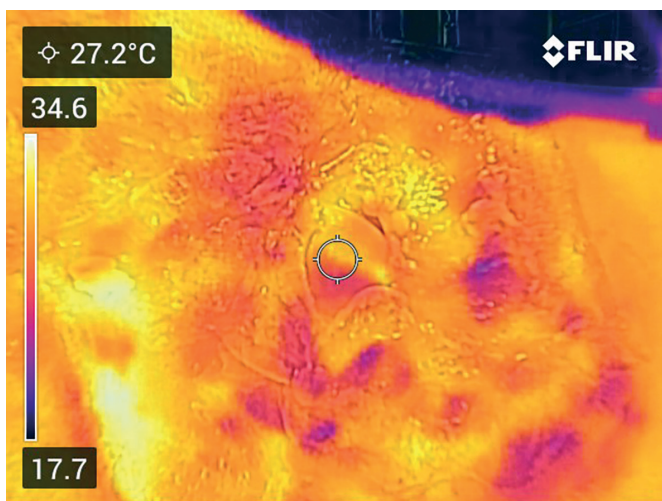


Рис. 5.2. Фототермограма (А) та фото (Б) дефекту м'яких тканин і кісткових структур лівого гомілково-стопного суглоба через 2 доби після первинної термографії, де відмічається прогресування некрозу блоку таранної кістки.

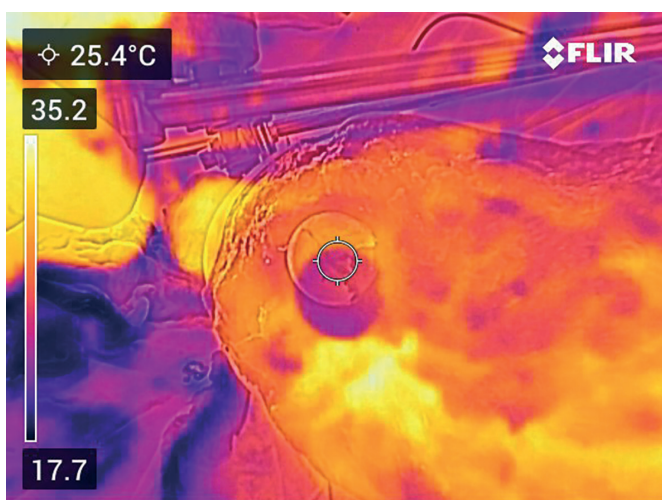


Рис. 6.1. Фототермограма (А) та фото (Б) дефекту м'яких тканин та кісткових структур ділянки лівого ліктьового суглоба та нижньо-середньої третини плеча. Зона інтересу – голівка променевої кістки.

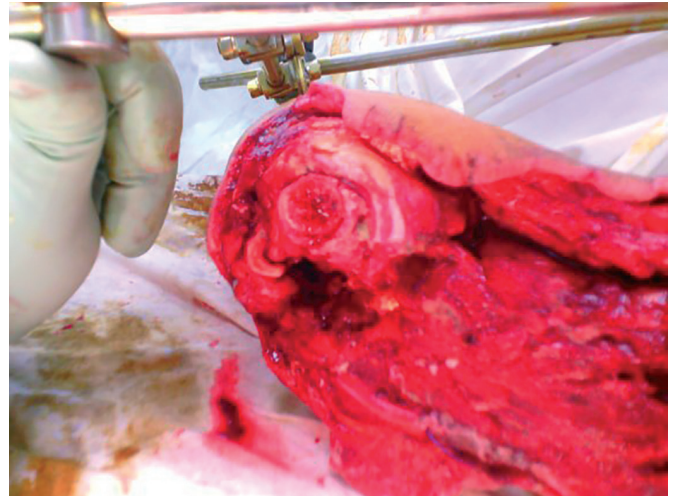
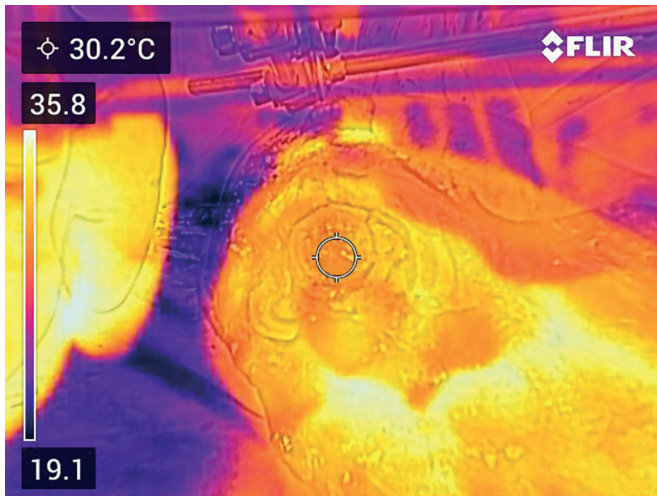


Рис. 6.2. Фототермограма (А) та фото (Б) дефекту м'яких тканин та кісткових структур ділянки лівого ліктьового суглоба та нижньо-середньої третини плеча. Зона інтересу – проксимальний відділ променевої кістки після резекції голівки променевої кістки

вимірювання та периферичною зоною покращився та склав 3,3 °С. Термографічне дослідження після резекції голівки променевої кістки демонструє підвищення температури проксимального відділу променевої кістки з 25,4 °С до 29,7 °С, зменшення температурного градієнта з 7,6 °С до 3,3 °С та більш рівномірний розподіл теплового поля. Це свідчить про покращення мікроциркуляції та збереження життєздатності проксимального відділу променевої кістки після резекції некротизованої голівки. Хворому проводилися етапні хірургічні обробки з використанням NPWT. Через 10 днів проведено контрольну термографію проксимального кінця променевої кістки для визначення її життєздатності. Після очищення та позитивного bleeding test проведено термографію (рис. 6.3).

Порівняно із попередньою термограмою є незначне підвищення центральної температури з 29,7 °С до 30,2 °С, що свідчить про збереження пер-

фузії. Температурний градієнт склав 2 °С. Враховуючи позитивний bleeding test, додаткова резекція кістки не проводилася. Планується оперативне втручання в об'ємі заміщення кісткового дефекту антибактеріальним цементним спейсером та закриття дефекту м'яких тканин торако-дорсальним клаптом.

У наступного пацієнта №7 було вогнепальне поранення правого гомілково-стопного суглоба з багатоуламковим переломом дистального метафіза обох кісток правої гомілки та таранної кістки з дефектом м'яких тканин і кісткової структури. Проведено термографію уламків медіальної кісточки (рис. 7.1) та таранної кістки (рис. 7.2).

Згідно з термопрофілем максимальна температура склала 32,1°С, мінімальна температура – 19,1°С. Центральна зона, що відповідає кістковим уламкам медіальної кісточки, має темно-фіолетовий колір та температуру 25,2°С, що свідчить про

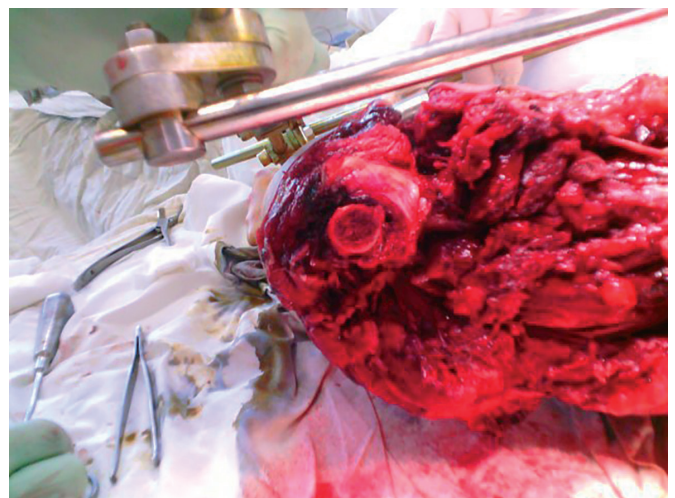
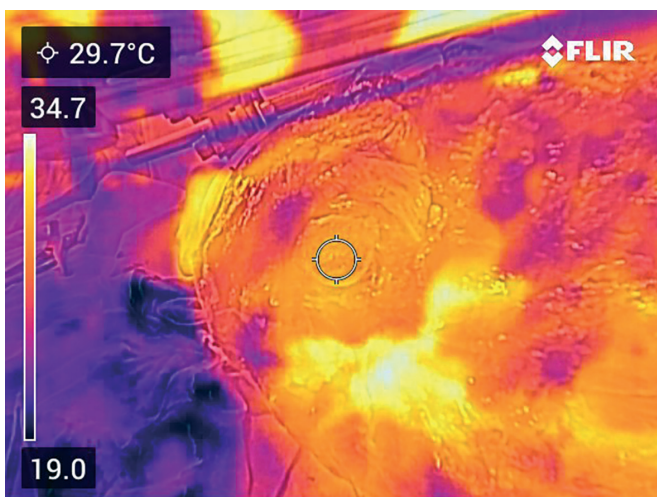


Рис. 6.3. Фототермограма (А) та фото (Б) дефекту м'яких тканин та кісткових структур лівого ліктьового суглоба та нижньо-середньої третини плеча через 10 днів після резекції голівки променевої кістки.

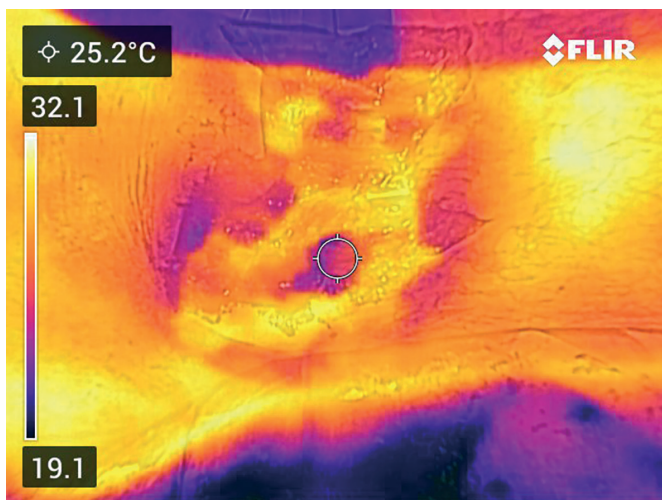


Рис. 7.1. Фототермограма (А) та фото (Б) дефекту м'яких тканин та кісткових структур правого гомілково-стопного суглоба

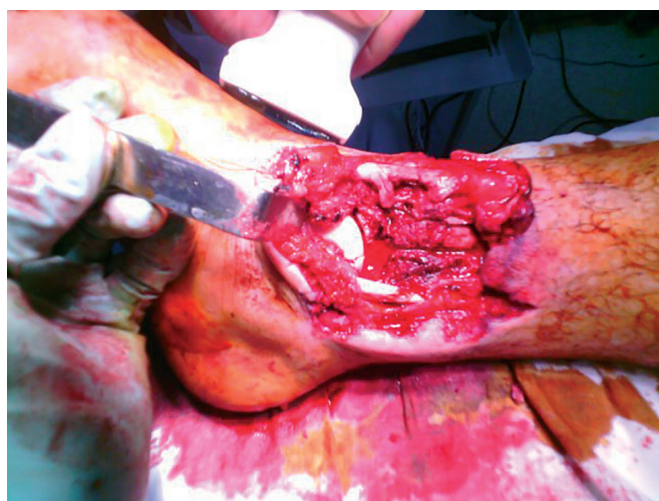
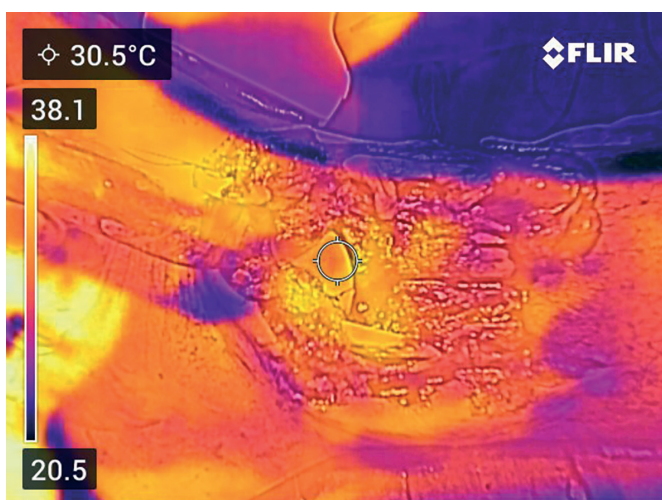


Рис. 7.2. Фототермограма (А) та фото (Б) дефекту м'яких тканин та кісткових структур правого гомілково-стопного суглоба

значне зниження локальної перфузії та ішемію кісткових фрагментів. Перифокальна зона має жовтий та оранжевий колір з температурою 30 °С, що відповідає післятравматичній запальній реакції та активному кровопостачанню навколо перелому. Температурний градієнт становить 4,8 °С, що свідчить про порушення мікроциркуляції в уламках внутрішньої кісточки. Враховуючи негативний «bleeding test» та показники термографії, проведено видалення фрагментів медіальної кісточки.

Після видалення фрагментів внутрішньої щиколотки проведено аналіз термопрофілю таранної кістки (рис. 7.2). Згідно з даними термограми максимальна температура складала 38,1 °С, мінімальна температура – 20,5 °С. Перифокальна температура – 32,3 °С. Центральна температура, що відповідає блоку таранної кістки – 29,8 °С. Температурний градієнт склав 2,5 °С, що свідчить про знижений кровотік, що потребує подальшого динамічного

спостереження та ревізії при проведенні повторних хірургічних обробок.

У пацієнта №8 із вогнепальним проникаючим осколковим пораненням лівого ліктьового суглоба з багатоуламковим переломом ліктьового відростка (olecranon) та дефектом м'яких тканин (альфа-тип) і кісткової структури проведено термографію уламків. Максимальна температура: 38,2 °С. Мінімальна температура: 21,9 °С. Центральна зона (уламки) має світло-жовтий/білуватий колір – 33,9 °С. Це нижче, ніж у навколишніх тканинах, але значно вище критичного рівня ішемії. Периферична зона (м'які тканини) має помаранчевий/червоний колір – 35,9 °С. Це відповідає гіперемії після травми або операції. Температурний градієнт – 2,0 °С. Таким чином, уламки ліктьового відростка зберігають життєздатність з помірно зниженою перфузією. Прийнято рішення про динамічне спостереження та повторну оцінку

життєздатності під час наступних хірургічних обробок.

У пацієнта № 9 із вогнепальним наскрізним осколковим пораненням верхньої третини лівої гомілки з дефектом м'яких тканин типу beta та кістковим дефектом проксимального метадіфізу великогомілкової кістки типу V3 на 3-тю добу після поранення проведено термографію (рис. 9).

Центральна температура склала 25,5 °С. Градієнт температури – 7,0 °С. Це характерно для некрозу кісткового уламка. Термопрофіль відповідає ішемічному типу з високим ризиком девіталізації центральної частини уламка при збереженій реактивній периферії. Враховуючи негативний «bleeding test» та показники термографії, проведено резекцію проксимального уламка великогомілкової кістки.

У пацієнта №10 із вогнепальним осколковим наскрізним пораненням нижньої третини правого передпліччя з дефектом м'яких тканин альфа-типу

та дефектом дистального епіметафізу променевої кістки типу V3 проведено термографію кісткового уламка дистального епіметафізу променевої кістки (рис. 10).

Максимальна температура: 29,7 °С, мінімальна температура: 13,1 °С. Центральна зона (уламки) – 27,5 °С. Це нижче, ніж у навколишніх тканинах, але значно вище критичного рівня ішемії. Температурний градієнт – 2,2 °С. «Bleeding test» позитивний. Таким чином, уламки зберігають життєздатність з помірно зниженою перфузією. Прийнято рішення про динамічне спостереження та повторну оцінку життєздатності під час наступних хірургічних обробок.

Інтегральний порівняльний аналіз виявлених термопрофільів пацієнтів та результатів «bleeding test» із визначенням прогнозу щодо життєздатності кісткових структур представлений у зведеній табл. №1.

Для прогнозування життєздатності кісткового

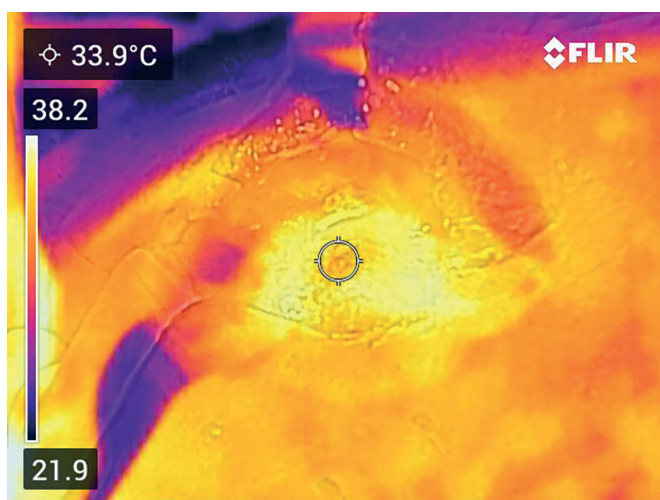


Рис. 8. Фототермограма (А) та фото (Б) дефекту м'яких тканин та кісткових структур лівого ліктьового суглоба.

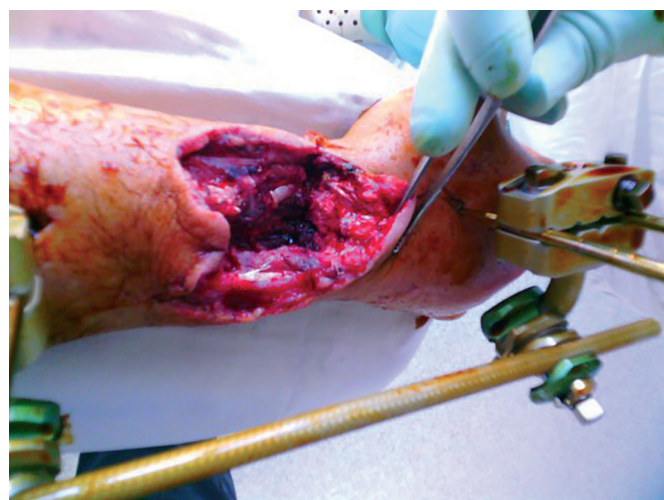
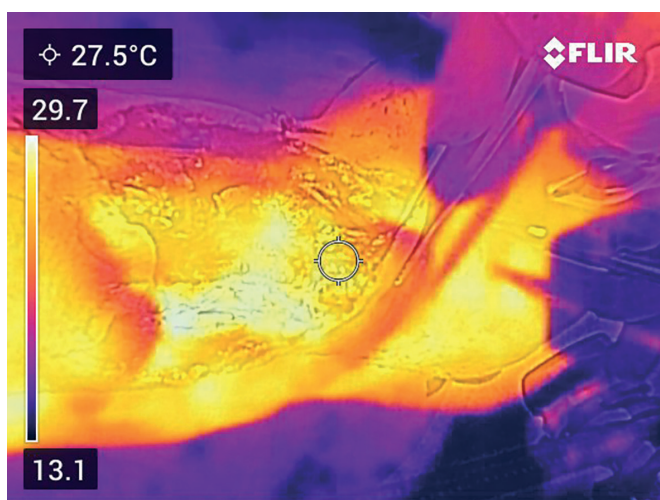


Рис. 9. Фототермограма (А) та фото дефекту м'яких тканин та кісткових структур (Б) проксимального відділу лівої гомілки через 3 доби після поранення.

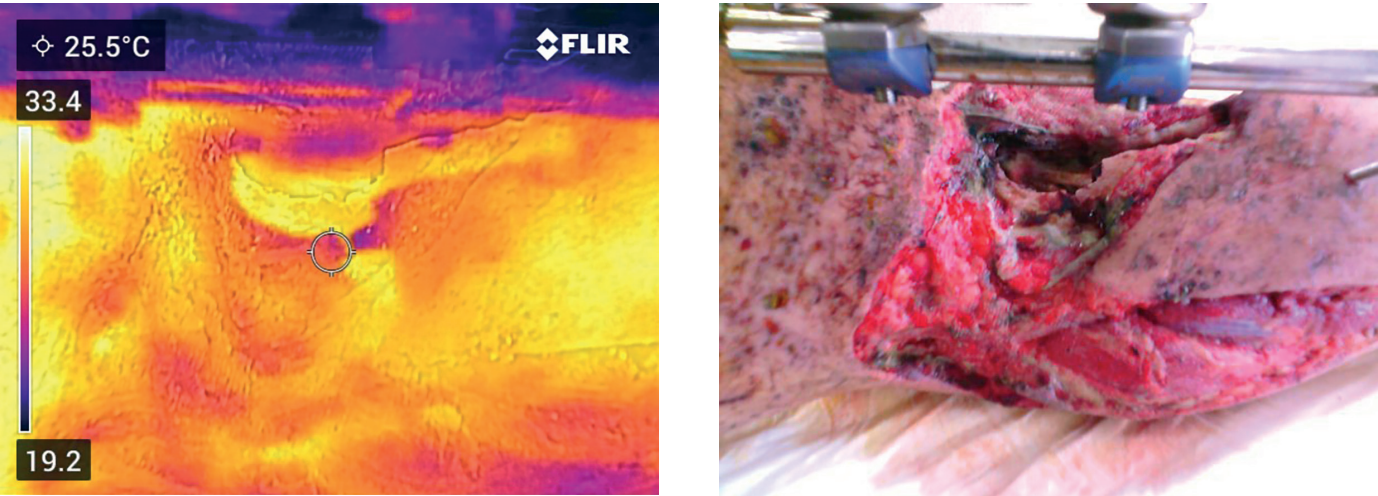


Рис. 10. Фототермограма (А) та фото дефекту м’яких тканин нижньої третини передпліччя та кісткових структур (Б) дистального метафізу променевої кістки.

Таблиця №1

Порівняльний аналіз термопрофілів пацієнтів та результатів «bleeding test» із визначенням прогнозу щодо життєздатності кісткових структур

Пацієнт	Центральна t °C	Наявність Холодні зони +/-	Температурний градієнт	«Bleeding test» +/-	Прогноз
№1	33,0	-	1,5	+	Життєздатна
№2	22,0	+	8	-	Некроз
№3	26,3	-	2,1	+	Сумнівно життєздатна
№4	31,0	-	2	+	Життєздатна
№5.1	29,8	-	4	+	Сумнівно життєздатна
№5.2	27.2	+	7	-	Некроз
№6.1	25.4	+	7.6	-	Некроз
№6.2	29.7	-	3.3	+	Сумнівно життєздатна
№6.3	30,2	-	2	+	Життєздатна
№7.1	25,2	+	4.8	-	Некроз
№7.2	29,8	-	2,5	+	Сумнівно життєздатна
№8	33,9	-	2	+	Життєздатна
№9	25,5	+	7	-	Некроз
№10	27,6	+	2,2	+	Сумнівно життєздатна

фрагменту брали до уваги центральну температуру, градієнт температур (ΔT), bleeding test та наявність холодних зон. Розрізняли наступні чотири категорії життєдіяльності кісткової структури: життєздатна, сумнівно життєздатна, сумнівно некротична та некротична.

Таким чином, у 72% випадків ІЧТ дозволила диференціювати життєздатні ділянки кістки від аваскулярних фрагментів, що дало змогу зберегти кісткові структури та провести первинну пластику. У 28% випадків виявлено приховані зони некрозу ($\Delta T > 4.0^{\circ}\text{C}$), що стало підставою для обмеженої чи радикальної резекції нежиттєздатних уламків та дозволило уникнути розвитку хронічного остеомиєліту у відтермінований період.

Автори усвідомлюють той факт, що ІЧТ оцінює поверхневу температуру та не дає прямої оцінки

ендостального кровопостачання. Результати дослідження залежать від експозиції рани, часу після дебридменту, температури операційної. Тому ми вважаємо, що для об’єктивізації отриманих даних надалі доцільно комбінувати термографію з іншими методиками, що дозволять оцінити функціональний та морфологічний стан верифікованих термопрофілів. З цією метою до комплексу наукових досліджень нами включено лазерну доплерівську флоуметрію та гістологічне морфометричне дослідження.

Наш досвід застосування ІЧТ дозволив підвищити ефективність інтраопераційного хірургічного планування об’єму оперативного втручання, що обумовило стійку тенденцію до покращення результатів лікування пацієнтів зі складною бойовою травмою суглобів. Отримані результати, на

нашу думку, підтверджують можливість використання ІЧТ як перспективного та інформативного неінвазивного інструмента оцінки життєздатності кісткової тканини при вогнепальних переломах кінцівок навколосуглобової локалізації, що дозволяє об'єктивізувати показання до резекції та мінімізувати обсяг оперативного втручання.

Висновки

1. Дистанційна інфрачервона спектральна термометрія – це перспективний неінвазивний метод оцінки життєздатності кісткової тканини з потенційною можливістю прогнозування клінічного перебігу бойової ортопедичної травми.

2. Згідно з результатами нашого дослідження центральна температура кісткових уламків коливалася від 22,0 до 33,9 °С, градієнт температур (ΔT) – від 1,5 до 7,6 °С. Основними показаннями для резекції кістки є градієнт температур (ΔT) $\geq 4,1$ °С у поєднанні з негативним «bleeding test».

3. Метод показав свою ефективність при проведенні оцінки змін життєздатності кісткових фрагментів у часі. Повторна термографія дала можливість з одного боку вчасно провести видалення ураженої ділянки, що зменшило ймовірність розвитку остеомієліту у майбутньому, з іншого – зберегти кісткові уламки та провести реконструкцію м'яких тканин, що також покращило результати лікування.

4. Перший досвід застосування інфрачервоної термометрії для визначення життєздатності кісткової тканини при суглобовій та навколосуглобовій локалізації вогнепальних переломів кісток кінцівок засвідчує підвищення ефективності інтраопераційного хірургічного планування об'єму оперативного втручання та обумовлює стійку тенденцію до покращення результатів лікування пацієнтів із складною бойовою травмою суглобів.

References

1. Auf der Strasse W, Campos DP, Mendonça CJA, Soni JF, Mendes J, Nohama P. Evaluation of tibia bone healing by infrared thermography: A case study. *Journal of Multidisciplinary Healthcare*. 2021; 14: 3161–3175. doi: 10.2147/JMDH.S330094.
2. Schepers T, Hagenaars T, Den Hartog D. An irreducible ankle fracture dislocation: the Bosworth injury. *J Foot Ankle Surg*. 2012;51(4):501-503. doi:10.1053/j.jfas.2012.04.011
3. Бур'янов ОА, Кваша ВП, Соболевський ЮЛ, Ярмолук ЮО, Кляпчук ЮВ, Лось ДВ, et al. Методологічні принципи

верифікації діагнозу та визначення тактики лікування в разі бойових ушкоджень кінцівок із дефектами кісткової тканини. Ортопедія, травматологія та протезування. 2024; 4: 5–13. doi: 10.15674/0030-5987202345-13.

Burianov O, Kvasha V, Sobolevskiy Y, Yarmoliuk Y, Klapchuk Y, Los D, et al. Methodological principles of diagnosis verification and treatment tactics determination in combat limb injuries with bone defects. *Orthopaedics Traumatology and Prosthetics*. 2024; 4: 5–13. doi: 10.15674/0030-5987202345-13. [in Ukrainian]

4. Ferreira N, Tanwar YS. Systematic approach to the management of post-traumatic segmental diaphyseal long bone defects: Treatment algorithm and comprehensive classification system. *Strategies in Trauma and Limb Reconstruction*. 2020;15(2):106–116. doi: 10.5005/jp-journals-10080-1466.

5. Guryev SO, Kushnir VA, Solovyov OS, Panasenko SI. Substantiation of indications for limb amputation in civilian victims with multisystem injuries as a result of modern warfare. *The Ukrainian Journal of Clinical Surgery*. 2025;92(1):49–54. doi: 10.26779/2786-832X.2025.1.49.

6. Joint Trauma System. War wounds: debridement and irrigation (CPG ID: 31). 2024.

7. Хоменко ІП, Цема ЄВ, Гуменюк КВ, Тertiшній СВ. Створення концепції термографічної класифікації вогнепальних поранень м'яких тканин *World Science*. 2020;4(56:1):32-36. doi: 10.31435/rsglobal_ws/30042020/7022.

Khomenko IP, Tsema YeV, Gumenuk KV, Tertyshnyi SV. Creation concept of thermographic classification of gunshot wounds of soft tissues. *World Science*. 2020;4(56:1):32-36. doi: 10.31435/rsglobal_ws/30042020/7022. [in Ukrainian]

8. Klapchuk Y, Los D, Burianov O, Yarmoliuk Y, Bazarov M, Lyanskorunsky V, et al. Reconstructive surgery for gunshot injuries of the knee: Experience from the Russo-Ukrainian War 2022–2024. *BMJ Military Health*. 2024;0:1–5. doi: 10.1136/military-2024-002799.

9. Liu Q, Li M, Wang W, Jin S, Piao H, Jiang Y, et al. Infrared thermography in clinical practice: A literature review. *European Journal of Medical Research*. 2025;30(1):33. doi: 10.1186/s40001-025-02278-z.

10. Lurin I, Khoroshun E, Burianov O, Klapchuk Y, Mansyrov A, Dinets A. The utility of 3D-printed titanium grid scaffolds for the management of gunshot bone injuries in patients wounded in Russo-Ukrainian war. *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma*. 2025;103214. doi: 10.1016/j.jcot.2025.103214.

11. Собко ІВ. Застосування інфрачервоної термографії при вогнепальних пораненнях живота. Запорізький медичний журнал. 2024; 26(3:144):258-264. doi: 10.14739/2310-1210.2024.3.298580.

Sobko I.V. The use of infrared thermography for abdominal gunshot wounds. *Zaporozhye Medical Journal*. 2024; 26(3:144):258-264. doi: 10.14739/2310-1210.2024.3.298580. [in Ukrainian]

12. Стояновський ІВ, Хіміч СД, Чемерис ОМ. Ефективність використання інфрачервоної термографії для діагностики некротизуючого фасциїту. Хірургія дитячого віку (Україна). 2024;3(84):38-43. doi: 10.15574/PS.2024.3(84).3843.

Stoianovskiy IV, Khimich SD, Chemerys OM. The effectiveness of infrared thermography in the diagnosis of necrotizing fasciitis. *Paediatric Surgery (Ukraine)*. 2024;3(84):38-43. doi: 10.15574/PS.2024.3(84).3843. [in Ukrainian]

Initial Experience with Infrared Thermography for Assessing Bone Tissue Viability in Gunshot Fractures of the Extremities Involving Articular and Periarticular Regions

Khoroshun E.M.^{1, 2}, Panasenko S.I.^{1, 3}, Klapchuk Yu.V.^{1, 2}✉, Neboduiko V.V.^{1, 2}

¹ Military Medical Clinical Center of the Northern Region, MFC of the AFU, Kharkiv, Ukraine

² Kharkiv National Medical University, Kharkiv, Ukraine

³ Poltava State Medical University, Poltava, Ukraine

Summary. Background. Infrared thermography (IRT) is widely used in vascular medicine, orthopedics, traumatology, the diagnosis of inflammatory conditions, and the assessment of inflammatory process development [12]. To date, scientific literature contains no studies specifically addressing the assessment of bone tissue viability in combat trauma using IRT. Existing studies have primarily focused on evaluating perfusion and delineating areas of soft-tissue necrosis, as well as the early detection of infectious inflammation [2, 7, 9, 12]. **Objective.** To evaluate the diagnostic capability of IRT as a method for intraoperative assessment of bone tissue viability in periarticular gunshot fractures associated with bone and soft-tissue defects. **Materials and Methods.** The study included 10 clinical cases of comminuted periarticular gunshot fractures with primary bone and soft-tissue defects. Thermographic examinations were performed using a portable FLIR C5 camera (FLIR Systems, USA). Bone fragment viability was assessed based on central temperature, temperature gradient (ΔT), the bleeding test, and the presence of cold zones. **Results.** The study demonstrated that, in 72% of cases, IRT enabled differentiation of viable bone areas from avascular fragments, allowing preservation of bone structures and primary reconstruction. In 28% of cases, occult areas of necrosis ($\Delta T > 4.0^{\circ}\text{C}$) were identified, providing an indication for limited or radical resection of nonviable fragments and helping to prevent the subsequent development of chronic osteomyelitis. **Conclusions.** IRT proved effective for assessing changes in bone fragment viability over time. This initial experience with IRT for assessing bone tissue viability in periarticular gunshot fractures demonstrates improved intraoperative planning of the extent of surgical intervention and indicates a consistent trend toward optimizing treatment outcomes in patients with complex combat-related joint injuries.

Key words: combat-related orthopedic trauma; gunshot fracture; joint injury; infrared thermography; bleeding test; bone necrosis.