

©Петро Муравйов^{1,2}

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7733-885X>

©Олександр Шаханов^{1,2}

ORCID <https://orcid.org/0009-0001-2735-2255>

©Олексій Васильєв¹

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7401-6337>

©Костянтин Кравець¹

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7721-1664>

¹Одеський національний медичний університет, Одеса, Україна

²КНП «Одеський обласний клінічний медичний центр» Одеської обласної ради, Одеса, Україна

Вульнерологічний моніторинг загоєння хронічних ран при застосуванні LiDAR-технології у пацієнтів із синдромом діабетичної стопи

Мета роботи: оцінити діагностичну точність та відтворюваність LiDAR- технології у вульнерологічному моніторингу хронічних ран у хворих із синдромом діабетичної стопи.

Матеріали і методи. Обстежено 50 пацієнтів із хронічними ранами (тривалість понад 4 тижні), класифікованими за Wagner та Texas. Морфометрію виконували за допомогою чотирьох методів: лінійні вимірювання, планіметрія, цифрова фотограмметрія та LiDAR-сканування. Оцінювали площу, об'єм і рельєф рани; аналізували міждослідницьке узгодження (ICC), систематичні похибки та динаміку загоєння протягом 4 тижнів.

Результати. LiDAR-технологія забезпечила найвищу точність та відтворюваність (ICC=0,972), перевищивши фотограмметрію (0,914), планіметрію (0,853) та лінійні вимірювання (0,781). Лінійний метод мав найбільше систематичне завищення площі (-1,45 см² порівняно з LiDAR). Через 4 тижні середня площа рани за LiDAR зменшилася з 11,42 до 7,86 см², тоді як фотограмметрія зафіксувала 8,31 см², а лінійні вимірювання – 8,92 см². Тижневий регрес площі був максимальним за LiDAR (5,3 %), у фотограмметрії становив 4,8 %, у лінійних вимірюваннях – 3,2 %. LiDAR- технологія продемонструвала найменшу похибку, високу стабільність результатів та найбільшу чутливість до мінімальних змін геометрії рани, що робить її ефективним інструментом для раннього виявлення як покращення, так і погіршення перебігу ранового процесу. Традиційні методи виявилися менш точними через контактність, варіабельність та низьку відтворюваність.

Висновки. LiDAR-сканування є високоточним, відтворюваним та клінічно значущим методом моніторингу хронічних ран, що може бути інтегрованим до стандартизованих алгоритмів лікування пацієнтів із синдромом діабетичної стопи.

Ключові слова: діабетична стопа; хронічна рана; загоєння ран; діагностика; тривимірна візуалізація; лазерне сканування.

Постановка проблеми й аналіз останніх досліджень та публікацій. Хронічні рани, що формуються при синдромі діабетичної стопи, становлять одну з найактуальніших проблем у сучасній хірургії та вульнерології [1, 2]. За даними останніх десятиліть, порушення репаративних процесів у пацієнтів із цукровим діабетом (ЦД) зумовлені нейроішемією, мікроангіопатією та імунними дисфункціями, що призводять до затримки загоєння, високої частоти інфекційних ускладнень і значного ризику ампутацій [1, 3]. Актуальність проблеми підтверджують дані WHO [4] та IDF [5], згідно з якими складні рани спостерігаються у 15–25 % хворих із ЦД, а їх лікування є економічно обтяжливим для систем охорони здоров'я.

Результати останніх досліджень показують, що успіх терапії хронічних ран прямо залежить

від точності кількісної оцінки їх площі та динаміки загоєння [6]. Традиційні методи – лінійні вимірювання або трасування на плівці – демонструють високу варіабельність та похибку, що у пацієнтів із діабетичною стопою часто призводить до недооцінки прогресування некрозу або інфекції [6, 7]. Потреба у неінвазивному, точному та відтворюваному інструменті моніторингу є одним із ключових викликів сучасної вульнерології.

За останні 5–7 років активно вивчаються цифрові технології – 3D-фотограмметрія, комп'ютерна планіметрія, оптичні сканери [8–10]. Особливе місце займає LiDAR (Light Detection and Ranging) [8], технологія дистанційного сканування, що використовує лазерне випромінювання для вимірювання відстані до поверхні та побудови її високо-точних тривимірних моделей і що забезпечує

тривимірне безконтактне вимірювання ран із похибкою <2 % та високою відтворюваністю результатів [11]. Проте у контексті саме діабетичної стопи питання клінічної валідації LiDAR, визначення критеріїв її точності, кореляції із традиційними методами та оптимального алгоритму застосування залишається недостатньо вивченим.

Мета роботи: оцінити діагностичну точність та відтворюваність LiDAR-технології у вульнерологічному моніторингу хронічних ран у хворих із синдромом діабетичної стопи.

Матеріали і методи. У дослідження було включено 50 пацієнтів із синдромом діабетичної стопи різних клінічних стадій відповідно до класифікацій Wagner [12] та Texas [13]. Критеріями включення були: наявність хронічного ранового дефекту тривалістю понад чотири тижні, підтверджений цукровий діабет 2 типу, а також можливість проведення серійних оглядів рани у рамках динамічного спостереження. Пацієнтів із критичною ішемією, що потребувала термінової ревазуляризації, або з тяжким інфекційним процесом, що вимагав невідкладного хірургічного втручання (розтин / дренивання, некректомія) та/або ампутації, до дослідження не включали. Серед учасників переважали хворі з довготривалим перебігом діабету та типовим комплексом ускладнень – сенсомоторною нейропатією, мікро- та макроангіопатією, зниженням больової чутливості та високим ризиком формування хронічних виразок у зонах перевантаження.

Усі пацієнти отримували стандартизоване консервативне лікування, що відповідає чинним європейським та міжнародним рекомендаціям. Терапевтичний комплекс передбачав обов'язкове розвантаження стопи за допомогою Total Contact Cast [14] або індивідуальних ортезів, оптимізацію глікемічного контролю, своєчасний дебридмент нежиттєздатних тканин, антибактеріальну терапію згідно з результатами мікробіологічних досліджень, місцеву терапію сучасними рановими покриттями та, за окремими показаннями, застосування негативного тиску [15]. Протягом усього періоду спостереження рани оглядали із визначеною періодичністю – у середньому один раз на 3–5 днів.

Основну увагу в роботі приділено методиці вимірювання параметрів ранового дефекту. Кожен дефект оцінювали за чотирма незалежними методами, що дозволяло визначити точність та відтворюваність різних підходів. Традиційні методики включали лінійні вимірювання рани за допомогою сантиметрової стрічки та трасування контуру дефекту на прозорій плівці з подальшим підрахунком площі за допомогою міліметрової сітки [16].

Такі методи, хоча й широко застосовуються у рутинній практиці, мають суттєві обмеження через контакт з рановою поверхнею, високу варіабельність результатів, значну залежність від досвіду дослідника та труднощі у вимірюванні ран із нерівним контуром або глибинними елементами.

Цифрова фотограмметрія застосовувалася як більш сучасний і менш інвазивний метод, що передбачав отримання стандартизованих фотографій із подальшим аналізом площі рани у спеціалізованому програмному забезпеченні [17]. Ця методика покращує відтворюваність, проте залишається чутливою до умов освітлення, кута нахилу камери та точності масштабування, що фактично обмежує її застосування при складних ранах.

LiDAR-технологію [11] було використано як основний метод дослідження. Сканування виконували за допомогою мобільного пристрою з інтегрованим лазерним сенсором, що дозволяло формувати високоточну тривимірну модель ранового дефекту без контакту зі шкірою. Пацієнта розташовували у стандартному положенні, забезпечували рівномірне освітлення та фіксували камеру на відстані, що дозволяла оптимальне захоплення глибини та площі. Програмне забезпечення автоматично генерувало цифрову 3D-поверхню та обчислювало площу, об'єм і параметри рельєфу рани (рис. 1). Це давало змогу отримувати стабільні, відтворювані значення навіть при значній нерівності контуру, наявності підритих країв або глибоких ділянок.

Порівняння LiDAR-методики з альтернативними методами здійснювали у стандартизованих умовах, використовуючи ті самі рани, що вимірювали в один і той самий день. Щоб мінімізувати вплив людського фактора, усі методики проводили три незалежні дослідники, після чого виконували аналіз міждослідницького узгодження. Такий дизайн забезпечував об'єктивність у визначенні точності, дозволяючи оцінити як систематичну похибку кожного методу, так і ступінь розбіжності між виконавцями.

Усі процедури відповідали принципам Гельсінської декларації, а дослідження було схвалене локальною комісією з етики [18]. Усі пацієнти підписали інформовану згоду на участь, були поінформовані про безконтактний характер LiDAR-сканування, відсутність шкідливого впливу та можливі переваги для клінічного моніторингу.

Статистичний аналіз передбачав багаторівневу оцінку точності методів. Для визначення відтворюваності застосовували коефіцієнт внутрішньокласової кореляції (ICC) у двофакторній змішаній моделі з абсолютним узгодженням [19].

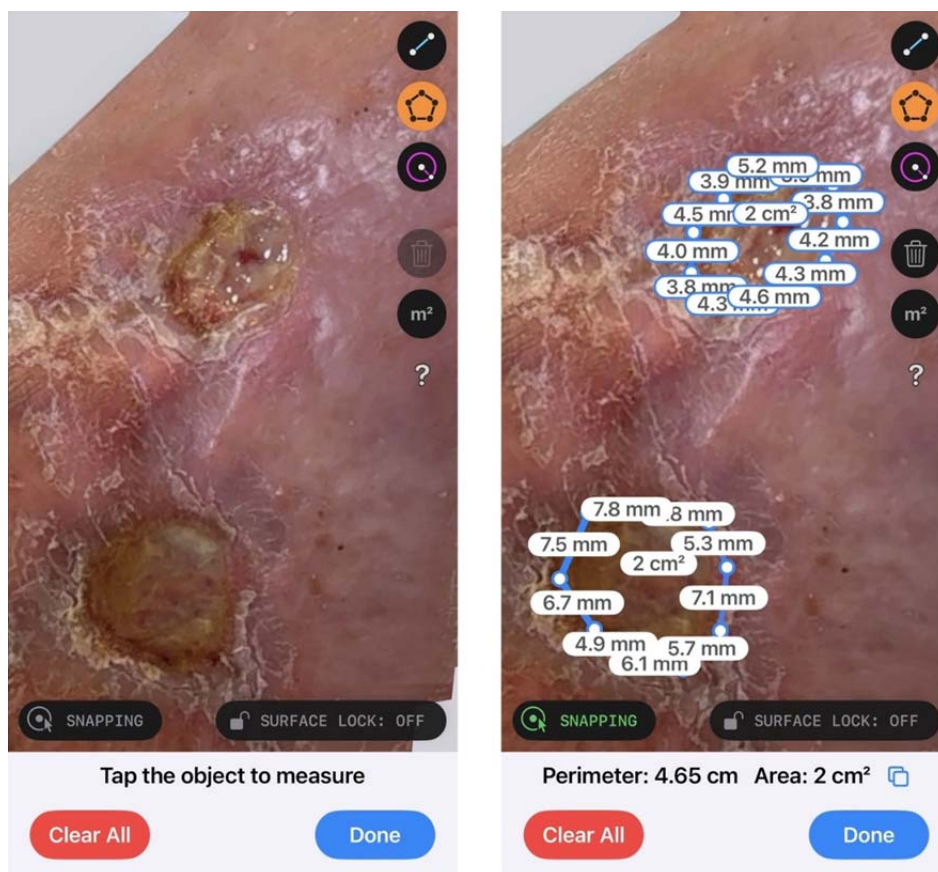


Рис. 1. Методологія оцінки розміру ран.

Для оцінки узгодження між методами застосовували аналіз Bland – Altman із побудовою графіка розбіжностей, розрахунком середньої різниці та 95 % довірчого інтервалу (ДІ). Систематичні помилки оцінювали за допомогою парного t-тесту або непараметричного аналогу, залежно від розподілу даних. Для опису змін площі рани у часі застосовували відносні та абсолютні показники з нормалізацією площі. Статистичні розрахунки проводили з використанням програмного забезпечення SPSS [20] та GraphPad Prism [21], а рівень значущості приймався на рівні $p < 0,05$.

Результати. У дослідження було включено 50 пацієнтів із синдромом діабетичної стопи (СДС), серед яких переважали чоловіки – 31 (62 %), тоді як жінок було 19 (38 %). Середній вік становив $(64,8 \pm 7,9)$ року (межі 48–82), що відповідає типовому профілю пацієнтів із хронічними ранами нейроішемічного генезу. Тривалість ЦД у вибірці була значною – медіана 14 років (IQR 9–21), що зумовлювало високий рівень супутніх ускладнень. Діабетична сенсомоторна полінейропатія виявлялася у 86 % ($n=43$), мікроангіопатія – в 68 % ($n=34$), макроангіопатія нижніх кінцівок – у 52 % ($n=26$), артеріальна гіпертензія – в 78 % ($n=39$), дисліпідемія – у

64 % ($n=32$), ожиріння I–III ст. – у 46 % ($n=23$). Знижену больову чутливість стопи за даними монофіламент-тесту (10 g) діагностовано у 82 % ($n=41$). Попередні ампутації (пальці, часткові резекції стопи) були в анамнезі у 18 % ($n=9$), що відображало хронічність та рецидивність патології.

Усі рани відповідали визначенню хронічних із тривалістю понад 4 тижні, при цьому нейропатичні виразки становили 58 % ($n=29$), нейроішемічні – 42 % ($n=21$). За класифікацією Wagner пацієнтів поділили таким чином: II ст. – 34 %, III ст. – 46 %, IV ст. – 20 %. За Texas Classification переважали комбінації 2B–3C, що поєднували інфекційний компонент з ішемією. Початкові морфометричні параметри, виміряні за допомогою LiDAR, становили: площа рани – $(11,42 \pm 1,36)$ cm^2 , середня глибина – $(0,7 \pm 0,2)$ см, об'єм дефекту – $(4,1 \pm 1,3)$ cm^3 . Для порівняння, лінійні вимірювання давали завищені показники площі – $(12,87 \pm 1,51)$ cm^2 , тоді як планіметрія – $(11,95 \pm 1,44)$ cm^2 . Базові інфекційні характеристики включали клінічні ознаки інфекції у 38 % пацієнтів, підтверджену бактеріальну колонізацію з біоплівковими властивостями – у 31 %, а попередні епізоди целюліту чи флегмони – в 16 %.

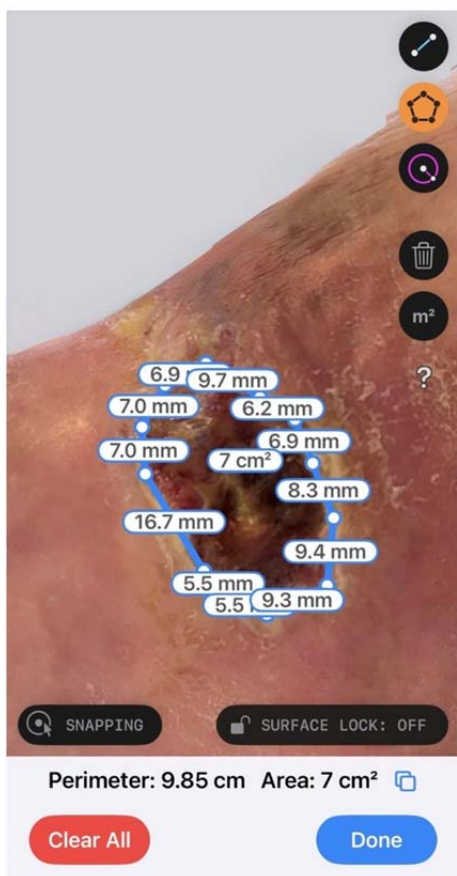
У динаміці чотиритижневого спостереження (рис. 2) середня площа ран за даними LiDAR зменшилася до $(7,86 \pm 1,12)$ cm^2 , тоді як фотограмметрія фіксувала показник $(8,31 \pm 1,17)$ cm^2 , а лінійні вимірювання – $(8,92 \pm 1,25)$ cm^2 .

Середній тижневий регрес площі становив $(5,3 \pm 0,7)$ % за даними LiDAR, $(4,8 \pm 0,9)$ % – за фотограмметрією та лише $(3,2 \pm 1,1)$ % – за лінійними вимірюваннями. LiDAR-сканування демонструвало найвищу відтворюваність: ICC=0,972 (95 % ДІ: 0,953–0,986), тоді як фотограмметрія мала ICC=0,914 (95 % ДІ: 0,871–0,948), планіметрія – 0,853 (95 % ДІ: 0,781–0,906), а лінійні вимірювання – 0,781 (95 % ДІ: 0,691–0,851). Результати аналізу за Bland – Altman показали найменші систематичні зміщення між LiDAR і фотограмметрією (середня різниця $-0,26$ cm^2 ; межі узгодження $-1,12 \dots +0,60$ cm^2), тоді як для пари LiDAR – середня різниця лінійних вимірювань становила $-1,45$ cm^2 із широкими межами узгодження $-3,92 \dots +1,02$ cm^2 . Середня абсолютна похибка LiDAR склала лише 1,2 % (95 % ДІ: $-1,8 \dots 3,6$ %), що було значно нижче порівняно з усіма традиційними методами.

Обговорення. Отримані результати продемонстрували, що використання LiDAR-технології забезпечує значно вищу точність, відтворюваність та чутливість до мінімальних змін розмірів хронічних ран порівняно з традиційними методами морфометрії. Це спостерігалось як на початковому етапі, де лінійні вимірювання стабільно завищували площу дефекту в середньому на $1,45$ cm^2 , так і в динаміці, де LiDAR-сканування забезпечило найвищий тижневий темп регресу (5,3 проти 3,2 % у лінійних вимірюваннях). Фактично це означає, що традиційні інструменти в рутинній практиці недооцінюють швидкість загоєння, а інколи – пропускають ранні ознаки погіршення, що може мати клінічні наслідки у пацієнтів із високим ризиком прогресування СДС.

Порівнюючи наші дані з доступними публікаціями, необхідно зазначити, що результати узгоджуються з даними Song та співавт. (2023), які також підтвердили точність LiDAR-знімання на рівні похибки <2 % при аналізі ран зі складною геометрією. Подібні висновки отримували і групи, які працювали з 3D-фотограмметрією, проте у нашому дослідженні саме LiDAR-сканування продемонструвало

Первинний огляд (0-й тиждень)



Контрольний візит (4-й тиждень)



Рис. 2. Динаміка загоєння ран.

вищу стабільність результатів, особливо при нерівних межах, підритих краях і різній глибині рани – ситуаціях, де фотограмметрія традиційно знижує точність через залежність від освітлення та кута знімання. Таким чином, наші дані не лише підтверджують попередні спостереження, а й показують, що у контексті саме діабетичної стопи LiDAR-сканування може бути більш надійним, ніж інші безконтактні методи, які широко обговорюються у літературі.

Важливим висновком нашого дослідження також є підтвердження того, що лінійні вимірювання – найпоширеніший у рутинній практиці спосіб оцінки ран є найменш точними. Це узгоджується з численними публікаціями, в яких наголошено на високій міждослідницькій варіабельності та низькій відтворюваності цього методу. Наші дані (ICC=0,781) практично ідентичні з результатами систематичних оглядів останніх років, де ICC рідко перевищував 0,80. Таким чином, результати підтверджують, що використання лінійних вимірювань при складних, нерівноконтурних ранах може викривлювати дані як у наукових роботах, так і в клінічних рішеннях.

На відміну від цього, LiDAR-технологія у нашому дослідженні забезпечила ICC=0,972, що перевищує більшість опублікованих даних щодо цифрової планіметрії та фотограмметрії (середній ICC=0,88–0,93 у різних роботах). Це свідчить про потенціал LiDAR стати референтним інструментом для кількісного моніторингу хронічних ран. Висока чутливість методу до навіть мінімальних змін площі та об'єму дозволяє виявляти ранні тенденції до покращення або, навпаки, до погіршення, що надзвичайно важливо у пацієнтів із нейроішемією, де затримка корекції лікувальної тактики може призводити до ампутацій.

Сильним боком дослідження є стандартизований дизайн із паралельним застосуванням чотирьох методів вимірювання, участю трьох незалежних дослідників та аналізом міждослідницького узгодження. Крім того, використання пацієнтів виключно із СДС робить вибірку відносно однорідною з точки зору патогенезу хронічних ран, що підвищує валідність отриманих висновків саме для цієї категорії. Проте необхідно зазначити і певні обмеження. По-перше, дослідження проводилося в умовах одного центру, що може обмежувати узагальнення висновків. По-друге, хоча LiDAR добре працює у стабільному освітленні, в реальних клінічних умовах (наприклад, госпітальні перев'язувальні) можуть бути ситуації, де умови сканування тяжче контролювати. Також метод не був протестований у пацієнтів із масивними мокнучими або глибокими гнійними ранами, що

потребують тампонади, – у таких випадках точність може знижуватися.

Невирішеними залишаються питання оптимізації алгоритму частоти сканувань, створення автоматизованих моделей прогнозування швидкості загоєння на основі 3D-рельєфу, а також валідація технології у пацієнтів із критичною ішемією, яких ми не включали у дослідження. Перспективним напрямком є поєднання LiDAR з машинним навчанням для автоматичного розпізнавання зон некрозу, грануляції та біоплівки, а також розробка мультипараметричних індексів загоєння, що базуватимуться не лише на площі, а й на об'ємі та топографії дефекту.

Підсумовуючи, LiDAR-технологія у нашому дослідженні продемонструвала високу діагностичну точність, стабільність і чутливість до мінімальних змін у стані рани, що вигідно відрізняє її від традиційних контактних інструментів, так і від двовимірних цифрових методів. Наші результати підтримують сучасні тенденції щодо переходу вульнерології до тривимірних технологій моніторингу, але водночас підкреслюють потребу в подальших багатоцентрових дослідженнях для остаточного підтвердження клінічної ефективності LiDAR у різних категоріях хронічних ран та інтеграції цієї технології у стандартизовані протоколи лікування СДС.

Висновки. 1. LiDAR-технологія продемонструвала найвищу діагностичну точність та відтворюваність, значно перевищуючи традиційні методи морфометрії хронічних ран. Коефіцієнт внутрішньокласової кореляції для LiDAR становив 0,972, що істотно вище, ніж для фотограмметрії (0,914), планіметрії (0,853) та лінійних вимірювань (0,781).

2. LiDAR-сканування забезпечувало найточнішу фіксацію динаміки загоєння, реєструючи середній щотижневий регрес площі (5,3±0,7) %, тоді як фотограмметрія – (4,8±0,9) %, а лінійні вимірювання – (3,2±1,1) %. Це дозволяє своєчасно виявляти як позитивні зміни, так і початкові ознаки погіршення перебігу ранового процесу.

3. Традиційні контактні методи (лінійні вимірювання, трасування на плівці) продемонстрували найбільшу систематичну похибку та варіабельність, зокрема стабільну тенденцію до завищення площі рани (-1,45 см² порівняно з LiDAR) та широкі межі узгодження, що підтверджує їх недостатню придатність для точного моніторингу складних дефектів у пацієнтів із СДС.

4. Отримані результати підтверджують доцільність інтеграції LiDAR у стандартизовані алгоритми вульнерологічного моніторингу, особливо при ранах із нерівними контурами та варіабельною глибиною. Технологія може стати референтним інструментом для оцінки загоєння, але потребує

подальшої багатоцентрової валідації у різних клінічних групах.

Конфлікт інтересів. Немає конфлікту інтересів.

Джерела фінансування. Власні кошти авторів.

Внесок авторів. Муравйов Петро – ідея та дизайн дослідження, концепція дослідження, аналіз та обговорення. Шаханов Олександр – ідея та дизайн дослідження, огляд літератури, написання тек-

сту. Васильєв Олексій – аналіз та обговорення. Кравець Костянтин – аналіз та обговорення, підготовка до друку.

Перспективи подальших досліджень полягають у багатоцентровій валідації використання LiDAR-технології для оцінки хронічних ран та розробці автоматизованих 3D-аналітичних моделей, що інтегруватимуть параметри глибини, об'єму й топографії дефекту для більш точного прогнозування загоєння.

References

1. Armstrong DG, Tan TW, Boulton AJM, Bus SA. Diabetic foot ulcers: a review. *JAMA*. 2023; 330(1):62-75. DOI: 10.1001/jama.2023.10578.
2. Akkus G, Sert M. Diabetic foot ulcers: a devastating complication of diabetes mellitus continues non-stop in spite of new medical treatment modalities. *World J Diabetes*. 2022; 13(12):1106-21. DOI: 10.4239/wjd.v13.i12.1106.
3. Jiang P, Li Q, Luo Y, Luo F, Che Q, Lu Z, et al. Current status and progress in research on dressing management for diabetic foot ulcer. *Front Endocrinol (Lausanne)*. 2023; 14:1221705. DOI: 10.3389/fendo.2023.1221705.
4. World Health Organization. Technical briefing for Appendix 3 of the Global Action Plan for Non-Communicable Diseases: Diabetes interventions. [Internet]. Available from: https://cdn.who.int/media/docs/default-source/ncds/mnd/technical-brief-diabetes.pdf?sfvrsn=5b304706_8.
5. International Diabetes Federation (IDF). Diabetic Foot. [Internet]. Available from: <https://idf.org/europe/life-with-diabetes/diabetes-related-complications/diabetic-foot>.
6. Fourati Kallel I, Kammoun JK, Lajnef H, Ben Ali S. Intelligent progress monitoring of healing wound tissues based on classification models. *Biomed Phys Eng Express*. 2025; 11(3). DOI: 10.1088/2057-1976/adc137.
7. Lucas Y, Niri R, Treuillet S, Douzi H, Castaneda B. Wound size imaging: ready for smart assessment and monitoring. *Adv Wound Care*. 2021; 10(11):641-61. DOI: 10.1089/wound.2018.0937.
8. Pisano G, van Oosterom MN, Ottens VA, Berrens AC, Slof LJ, Çakal BA, et al. Back-table specimen scanning using gantry-free hybrid hSPECT/LiDAR imaging: a feasibility study during PS-MA-radioguided surgery. *Surg Endosc*. 2025; 39(10):6943-54. DOI: 10.1007/s00464-025-12081-w.
9. Massini F, Ebert L, Ampanozi G, Franckenberg S, Benz L, Sieberth T. Comparison of superficial wound documentation using 2D forensic photography, 3D photogrammetry, Botscan® and VR with real-life examination. *Forensic Sci Med Pathol*. 2021; 17(3):422-30. DOI: 10.1007/s12024-021-00393-x.
10. Bai X, Zhang H, Jiao Y, Yuan C, Ma Y, Han L. Digital health interventions for chronic wound management: a systematic review and meta-analysis. *J Med Internet Res*. 2024; 26:e47904. DOI:10.2196/47904.
11. Song B, Kim J, Kwon H, Kim S, Oh SH, Ha Y, et al. Smartphone-based LiDAR application for easy and accurate wound size measurement. *J Clin Med*. 2023; 12(18):6042. DOI: 10.3390/jcm12186042.
12. Shah P, Inturi R, Anne D, Jadhav D, Viswambharan V, Khadilkar R, et al. Wagner's classification as a tool for treating diabetic foot ulcers: our observations at a suburban teaching hospital. *Cureus*. 2022; 14(1):e21501. DOI: 10.7759/cureus.21501.
13. Jeon BJ, Choi HJ, Kang JS, Tak MS, Park ES. Comparison of five systems of classification of diabetic foot ulcers and predictive factors for amputation. *Int Wound J*. 2017; 14(3):537-45. DOI: 10.1111/iwj.12642.
14. Sibbald RG, Ayello EA. Total contact cast for diabetic foot ulcers: an underused "gold standard." *Adv Skin Wound Care*. 2019; 32(6):247. DOI: 10.1097/01.ASW.0000558272.10192.c5.
15. Likuvannya syndromu diabetichnoyi stopy. Ministerstvo okhorony zdorov'ya Ukrainy. Nastanova 00497 [Treatment of diabetic foot syndrome. Ministry of Health of Ukraine. Guideline 00497]. [Internet]. Available from: <https://guidelines.moz.gov.ua/documents/3333>. Ukrainian.
16. Lucas Y, Niri R, Treuillet S, Douzi H, Castaneda B. Wound size imaging: ready for smart assessment and monitoring. *Adv Wound Care*. 2021; 10(11):641-61. DOI: 10.1089/wound.2018.0937.
17. Wendelken ME, Berg WT, Lichtenstein P, Markowitz L, Comfort C, Alvarez OM. Wounds measured from digital photographs using photodigital planimetry software: validation and rater reliability. *Wounds*. 2011; 23(9):267-75.
18. Zaporozhan VM, Aryayev ML. Bioetyka ta biobezpeka [Bioethics and Biosafety]. Kyiv. Zdorov'ya. 2013; 456. Ukrainian.
19. Antomonov M.YU. Matematychna obrobka ta analiz medyko-biologichnykh danykh. 2-e vyd. [Mathematical processing and analysis of medical and biological data. 2nd ed.]. Kyiv. Medinform. 2018; 579. Ukrainian.
20. George D, Mallery P. IBM SPSS Statistics 29 Step by Step: A Simple Guide and Reference. 18th ed. London: Routledge; 2024. 440 p. ISBN: 9781032621937.
21. Motulsky HJ. Advice: When to plot SD vs. SEM. In: GraphPad Statistics Guide. [Internet]. Available from: <http://www.graphpad.com/guides/prism/10/statistics/index.htm?statwhentoplotsdvssem.htm>. Accessed 2025 Nov. 16.

Надійшла до редакції / Received for editorial office on: 30.03.2026
 Прийнята після рецензування / Accepted after review on: 28.04.2026
 Подана до друку / Submitted for printing on: 20.05.2026

Електронна адреса для листування: gemostatik@gmail.com

Petro Muraviov^{1,2}, Oleksandr Shakhanov^{1,2}, Oleksiy Vasyliiev¹, Kostiantyn Kravets¹

¹Odesa National Medical University, Odesa, Ukraine

²Municipal Non-Profit Enterprise "Odesa Regional Clinical Medical Center" of the Odesa Regional Council, Odesa, Ukraine

Wound-care monitoring of chronic wounds healing using lidar technology in patients with diabetic foot syndrome

The aim of the work: to evaluate the diagnostic accuracy and reproducibility of LiDAR technology in wound monitoring among patients with diabetic foot-associated chronic ulcers.

Materials and Methods. 50 patients with chronic wounds (lasting more than 4 weeks), classified according to the Wagner and Texas systems, were examined. Wound morphometry was performed using four methods: linear measurement, planimetry, digital photogrammetry, and LiDAR scanning. Wound area, volume, and surface topography were assessed; inter-observer agreement (ICC), systematic measurement bias, and 4-week healing dynamics were analyzed.

Results. LiDAR demonstrated the highest accuracy and reproducibility (ICC=0.972), outperforming photogrammetry (0.914), planimetry (0.853), and linear measurements (0.781). Linear measurement showed the greatest systematic overestimation of wound area (-1.45 cm² compared to LiDAR). After 4 weeks, the mean wound area measured by LiDAR decreased from 11.42 to 7.86 cm², while photogrammetry recorded 8.31 cm² and linear measurement 8.92 cm². Weekly wound-area regression was highest with LiDAR (5.3 %), compared with 4.8 % for photogrammetry and 3.2 % for linear measurement. LiDAR demonstrated the lowest measurement error, highest stability, and greatest sensitivity to minimal geometric changes, making it a valuable tool for early detection of both improvement and deterioration in chronic wound healing. Traditional contact-based methods proved less accurate due to variability, operator dependence, and limited reproducibility.

Conclusions. LiDAR is a highly accurate, reproducible, and clinically meaningful method for chronic wound monitoring and may be integrated into standardized management algorithms for diabetic foot ulcers.

Key words: diabetic foot; chronic wound; wound healing; diagnostics; three-dimensional imaging; laser scanning.

Відомості про авторів

Муравйов Петро – доктор медичних наук, професор кафедри хірургії з післядипломною освітою Одеського національного медичного університету, лікар-хірург КНП «Одеський обласний клінічний медичний центр» Одеської обласної ради, Одеса, Україна, e-mail: gemostatik@gmail.com.

Шаханов Олександр – аспірант кафедри хірургії з післядипломною освітою Одеського національного медичного університету, лікар-хірург КНП «Одеський обласний клінічний медичний центр» Одеської обласної ради, Одеса, Україна, e-mail: bafometry@gmail.com.

Васильєв Олексій – кандидат медичних наук, асистент кафедри хірургії з післядипломною освітою Одеського національного медичного університету, Одеса, Україна, e-mail: leovasiliev86@gmail.com.

Кравець Костянтин – доктор філософії кафедри хірургії з післядипломною освітою Одеського національного медичного університету, Одеса, Україна, e-mail: k.v.kravets@gmail.com. Наразі служить у Збройних Силах України.

Information about the authors

Muraviov Petro – DSc (Medicine), Professor of the Department of Surgery with postgraduate education, Odesa National Medical University, Surgeon, Municipal Non-Profit Enterprise "Odesa Regional Clinical Medical Center" of the Odesa Regional Council, Odesa, Ukraine, e-mail: gemostatik@gmail.com.

Shakhanov Oleksandr – Postgraduate PhD Student of the Department of Surgery with postgraduate education, Odesa National Medical University, Surgeon, Municipal Non-Profit Enterprise "Odesa Regional Clinical Medical Center" of the Odesa Regional Council, Odesa, Ukraine, e-mail: bafometry@gmail.com.

Vasyliiev Oleksiy – PhD (Medicine), Assistant Professor of the Department of Surgery with postgraduate education, Odesa National Medical University, Odesa, Ukraine, e-mail: leovasiliev86@gmail.com.

Kravets Kostiantyn – PhD (Medicine) of the Department of Surgery with postgraduate education, Odesa National Medical University, Odesa, Ukraine, e-mail: k.v.kravets@gmail.com. He is currently serving in the Armed Forces of Ukraine.