
Обзор литературы

УДК 616-001.4:004.8:338.46

DOI 10.52246/1606-8157_2026_31_2_48

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОГНОСТИЧЕСКИЕ ШКАЛЫ В ОЦЕНКЕ РАНЕВОГО ПРОЦЕССА: КЛИНИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ, АНАЛИЗ РЫНКА И ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ

В. С. Лесовик¹, кандидат медицинских наук, forestkiller@yandex.ru,

А. А. Нецкина², netskina.n05@yandex.ru,

О. В. Зайцев², доктор медицинских наук, ozaitsev@yandex.ru

¹ ГБУЗ МО «Одинцовская областная больница». 142003, Россия, Московская область, г. Одинцово, ул. Маршала Бирюзова, д. 5

² ФГБОУ ВО «Рязанский государственный медицинский университет им. академика И. П. Павлова» Минздрава России, 390025, Россия, г. Рязань, ул. Высоковольтная, д. 11.

РЕЗЮМЕ Проанализирована эволюция методов оценки состояния ран: от клинических шкал до цифровых платформ с искусственным интеллектом. Стандартизация оценки критически важна для объективного мониторинга заживления, прогнозирования рисков и оптимизации междисциплинарного взаимодействия. Такие специализированные шкалы для диабетической стопы, как Wifl и SINBAD, демонстрируют высокую прогностическую ценность в стратификации риска ампутации. Цифровые системы (Swift Medical, Tissue Analytics) обеспечивают точность измерений до 95–98 % и снижают межэкспертную вариабельность на 60–80 %.

Анализ мирового рынка (2015–2025) показывает рост объёма сегмента с 450 млн до 1,8 млрд долларов (CAGR – 14,3 %) с прогнозом до 4,2 млрд долларов к 2030 году. Драйверы роста: старение населения, распространённость сахарного диабета, развитие телемедицины. Клинические данные подтверждают, что цифровое документирование сокращает время оценки состояния раны более чем в 2 раза и снижает стоимость лечения на 12 %. ИИ-модели выявляют риск развития сепсиса на 4–6 часов раньше традиционных критериев. Барьеры внедрения: фрагментация стандартов, требования к качеству данных, интеграция с медицинскими информационными системами. Перспективы: мультимодальный анализ, объяснимый искусственный интеллект, удалённый мониторинг.

Комбинация валидированных шкал и цифровых платформ – доказательно обоснованная стратегия повышения качества и экономической эффективности лечения хронических и гнойных ран.

Ключевые слова: шкалы оценки, раны, искусственный интеллект, клиническая эффективность.

DIGITAL TECHNOLOGIES AND PROGNOSTIC SCALES IN WOUND ASSESSMENT: CLINICAL UTILITY, MARKET ANALYSIS, AND IMPLEMENTATION PATHWAYS

V. S. Lesovik, A. A. Netskina, O. V. Zaitsev

ABSTRACT The evolution of wound assessment methods – from clinical scoring systems to AI-powered digital platforms – is analyzed. Standardization of wound evaluation is critical for objective healing monitoring, risk prediction, and optimization of interdisciplinary collaboration. Specialized diabetic foot scales such as Wifl and SINBAD demonstrate high prognostic value in stratifying amputation risk. Digital systems (Swift Medical, Tissue Analytics) achieve measurement accuracy of 95–98% and reduce inter-rater variability by 60–80 %.

Global market data (2015–2025) indicate growth from USD 450 million to 1.8 billion (CAGR: 14.3%), with projections reaching USD 4.2 billion by 2030. Key growth drivers include population aging, rising diabetes prevalence, and telemedicine expansion. Clinical evidence confirms that digital documentation reduces wound assessment time by more than half and lowers treatment costs by 12%. AI-based models detect sepsis risk 4–6 hours earlier than conventional criteria.

Implementation challenges include fragmented standards, data quality requirements, and integration with electronic health records. Future directions encompass multimodal analysis, explainable AI, and remote monitoring capabilities.

The integration of validated clinical scales with digital platforms represents an evidence-based strategy for improving both clinical outcomes and cost-effectiveness in the management of chronic and infected wounds.

Keywords: wound assessment scales, wound healing, artificial intelligence, clinical utility.

Лечение ран представляет собой актуальную проблему современного здравоохранения, затрагивающую миллионы пациентов во всём мире. Точная оценка состояния раны и мониторинг заживления имеют важное значение для оптимизации процесса лечения [1, 2]. По данным отчёта о развитии рынка цифровых технологий для измерения и оценки состояния ран, объём рынка устройств в США в 2022 г. составил 75,7 млн долларов, к 2032 году он достигнет 135 млн долларов. Рынок программного обеспечения в 2022 г. оценивался в 60,1 млн долларов, с ожидаемым среднегодовым темпом роста 5,8 % до 2032 г. [3, 4].

Традиционные методы оценки состояния ран, основанные на визуальном осмотре и ручных измерениях при помощи различных линеек характеризуются субъективностью и низкой воспроизводимостью, что стимулирует развитие объективных цифровых технологий [5]. Цифровые системы используют технологии компьютерного зрения, 3D-визуализацию, искусственный интеллект (ИИ) и машинное обучение для автоматизированного анализа характеристик раны, включая размеры, площадь, объём, тканевой состав и признаки инфекции. Современные исследования демонстрируют, что внедрение цифровых систем позволяет повысить точность измерений на 54 %, сократить время оценки и улучшить прогнозирование заживления [6].

Современные цифровые системы оценки ран можно классифицировать по нескольким критериям.

По типу используемых технологий:

- Системы на основе двумерной (2D) фотографии.
- Трёхмерные (3D) системы с использованием структурированного света или стереокамер.
- Системы флуоресцентной визуализации для детекции бактерий.
- Термографические системы для оценки выраженности воспаления.
- Мультиспектральные и гиперспектральные системы [7, 8].

По платформе реализации:

- Мобильные приложения для смартфонов и планшетов.
- Специализированные аппаратные устройства.
- Облачные платформы для телемедицины.
- Интегрированные системы с электронными медицинскими картами (EHR) [9].

По функциональности:

- Системы измерения и документирования.
- Системы с элементами ИИ для прогнозирования заживления.
- Комплексные платформы управления лечением ран [10].

Основываясь на анализе рынка цифровых услуг, 74 % выручки в 2022 году приходилось на сегмент систем 3D-сканирования. В сравнении с технологией 2D 3D позволяет максимально

точно и точно измерить и оценить состояние раны, обеспечивая высокий уровень детализации для ран неправильной формы с наличием карманов и затёков. Это особенно важно для сложных ран, таких как пролежни или язвы под давлением. Технологии краевой видеометрии (VeV) и стереофотограмметрии (SPG) активно используются для компьютерной планиметрии [11, 12].

Флуоресцентные методы визуализации ран основаны на способности определённых молекул (флуорофоров) переизлучать свет при поглощении фотонов [13]. Они позволяют неинвазивно оценивать состояние ран, выявлять бактериальную нагрузку и ишемию тканей. Используются специальные красители или биосовместимые агенты, например индоцианин зелёный (ICG), которые подсвечиваются при определённом освещении. В режиме реального времени флуоресцентная микроскопия позволяет определить области с наибольшей бактериальной обсеменённостью и наличием биоплёнок. Метод может выявлять ингибирующую заживление бактериальную нагрузку на уровне $>10^4$ КОЕ/г, диапазон результативности составляет 93–100 % [14–18]. По интенсивности флуоресценции возможно определить перфузию тканей, состояние соединительной ткани и в некоторых случаях выполнить изменение pH [19–22].

При этом метод имеет ограничения по типам бактерий, так как некоторые патогены не продуцируют порфирины (например, из родов *Streptococcus*, *Enterococcus* и *Finogoldia* spp.); подвержен влиянию внешних факторов, таких как температура, pH, концентрация ионов; требует специального оборудования [23–26].

Термографические системы для оценки воспаления основаны на регистрации инфракрасного излучения, исходящего от тела человека. Они позволяют визуализировать распределение температуры на поверхности тела и выявлять области гипертермии, свидетельствующие о воспалительном процессе [27–29]. Для повышения точности диагностики также применяют функциональные пробы – провоцирующее тестирование (охлаждение или нагревание), в результате проведения которого регистрируется динамика восстановления тепловой картины. Сравнение последовательных термограмм по-

зволяет отслеживать прогрессирование или регресс воспалительного процесса [30–33].

Преимущества термографических систем – в их неинвазивности, безопасности, возможности собрать количественные данные о температуре, а также динамического наблюдения. Однако имеется и ряд существенных недостатков: зависимость от условий внешней среды, ограничение в оценке глубины тканей, сложность в интерпретации результатов [34–38].

Мультиспектральные (MSI) и гиперспектральные (HIS) системы визуализации представляют собой перспективные оптические технологии, основанные на анализе спектральных характеристик тканей [39–42].

Мультиспектральные системы фиксируют изображения в нескольких дискретных спектральных диапазонах (видимый свет, ближний инфракрасный диапазон) и применяются для:

- оценки степени воспаления и ишемии;
- контроля перфузии тканей;
- мониторинга изменений в раневом ложе при использовании прозрачных перевязочных материалов [43–46].

Гиперспектральные системы собирают данные в узком спектральном диапазоне (часто от 250 до 15 000 нм), формируя «гиперспектральный куб данных», что позволяет:

- анализировать содержание хромофоров (гемоглобина, меланина) для оценки кровоснабжения и оксигенации;
- выявлять бактериальную нагрузку и биоплёнки благодаря спектральным особенностям порфиринов;
- дифференцировать типы тканей в ране (некроз, грануляции, фибрин);
- оценивать тяжесть раневого процесса и эффективность лечения [47–52].

Ограничения: высокая стоимость оборудования и повышенные требования к вычислительной технике из-за сложности обработки больших массивов данных [50, 51].

Современные технологии прогнозирования состояния ран развиваются в следующих направлениях:

1. Интеграция мультимодальных данных: комбинирование изображений, биомаркеров (уровень С-реактивного белка), клинических показателей и данных микробиома.
2. Персонализация: алгоритмы учитывают индивидуальные особенности пациента (возраст, сопутствующие заболевания, генетику).
3. Непрерывный мониторинг: носимые устройства и биосенсоры, позволяющие собирать данные в режиме реального времени.
4. Интеграция с телемедициной: удалённый доступ к данным и консультациям специалистов, повышающие доступность качественной помощи [50].

Основными вызовами на сегодняшний день являются: необходимость получения больших объёмов данных для обучения моделей и клинических испытаний для подтверждения эффективности и безопасности, вопросы конфиденциальности.

Цифровые решения для раневого менеджмента представлены на рынке широким спектром технологий. Нами выполнен детальный разбор ведущих коммерческих систем: проанализированы принципы их действия и данные клинической валидации.

Системы флуоресцентной визуализации бактериальной нагрузки

MolecuLight i:X (Канада) представляет собой портативное неинвазивное устройство, использующее технологию флуоресцентной съёмки для обнаружения бактерий и измерения площади поражения в режиме реального времени. Принцип действия основан на использовании фиолетового света (405 нм) и двойного полосового оптического фильтра. При освещении раны в течение 90 секунд (после чего устройство автоматически отключается) коллаген тканей излучает зелёную флуоресценцию, тогда как бактерии (например, *Staphylococcus aureus* и *Pseudomonas aeruginosa*) излучают красную или синюю флуоресценцию вследствие продукции порфиринов или пиовердина [5]. Для измерения площади используются маркеры WoundStickers, размещаемые по краям раны, при оптимальной дистанции съёмки 8–12 см. Процедура требует проведения в затемнённом помещении [6].

Клинические исследования показывают, что устройство позволяет обнаруживать повышенную бактериальную нагрузку ($>10^4$ КОЕ/г) и измерять геометрические параметры раны с точностью более 95 % [7]. Флуоресцентная визуализация помогает определить области для забора посева и контролировать процесс дебридмента. Данные сохраняются на устройстве и могут быть интегрированы в электронную медицинскую карту (EHR) [8]. Ряд исследований демонстрирует, что технология позволяет избежать необоснованного применения системных и топических антибиотиков, а также выявлять бессимптомные раны с высокой бактериальной нагрузкой [9]. К ограничениям относятся невозможность использования при наличии крови, некротических масс или серебросодержащих препаратов, препятствующих проникновению света, а также необходимость обучения персонала [10].

Kent Imaging SnapshotGLO (Канада) – устройство для визуализации бактериальной аутофлуоресценции, получившее одобрение FDA в 2025 году. Оно дополняет систему SnapshotNIR и позволяет неинвазивно оценивать бактериальную нагрузку, обеспечивая комплексный подход к диагностике инфекции [11].

Системы на основе искусственного интеллекта и мультиспектрального анализа

DeepView (Spectral AI, Великобритания) – платформа на базе ИИ, сочетающая алгоритмы машинного обучения и мультиспектральную визуализацию для прогнозирования заживления. Изначально ориентированная на ожоговых пациентов, система использует проприетарную клиническую базу данных, включающую крупнейшую в мире базу биопсий тканей при ожогах [12]. Процесс съёмки занимает 2 секунды. Алгоритмы ИИ анализируют изображения в сочетании с клиническими данными пациента и строят прогноз траектории заживления, предоставляя врачу бинарный ответ («да/нет») о перспективах выздоровления. Технология лишена субъективизма, минимизирует человеческий фактор и обеспечивает высокую прогностическую ценность [13]. Система интегрируется с любыми электронными медицинскими системами, упрощая координацию лечения [14].

Tissue Analytics (Net Health, США) использует алгоритмы машинного обучения и компьютер-

ного зрения для анализа изображений, полученных с мобильных устройств. Система автоматически определяет длину, ширину, площадь и объём раны с ошибкой менее 4 %, а также фиксирует процентное соотношение типов тканей в раневом ложе. Визуализация данных осуществляется через графики и диаграммы. Среднее время обработки запроса составляет 5 минут. Платформа совместима со многими EHR и предусматривает оповещение о рисках ухудшения состояния раны [15]. К недостаткам относится необходимость онлайн-работы, отсутствие рекомендаций по тактике лечения и возможные неточности при измерении глубины глубоких ран [16].

Системы оценки оксигенации и термографии

Kent Imaging SnapshotNIR (Канада) использует ближнюю инфракрасную спектроскопию для визуализации оксигенации тканей. Преимуществом устройства является способность измерять уровень кислорода в микрососудистой сети, фиксируя уровень оксигемоглобина и дезоксигемоглобина. В отличие от традиционных методов, оценивающих макрососудистый кровоток, SnapshotNIR показывает реальное насыщение тканей кислородом [17]. Устройство наиболее распространено в уходе за ранами, ожогами, пластической хирургии и для оценки эффективности гипербарической оксигенации [18].

WoundVision Scout (США) сочетает цифровую камеру и длинноволновую инфракрасную камеру (LWIR) для захвата визуальных и тепловых изображений. Система позволяет измерять размеры раны с точностью до 96 % по сравнению с бумажными линейками и оценивать температуру кожи для выявления изменений перфузии и метаболической активности [19]. Тепловые изображения помогают обнаружить области с нарушением кровоснабжения. Система способствует равному доступу к качественной помощи, помогая преодолевать сложности оценки состояния ран у пациентов с тёмным фототипом кожи [20].

Системы замкнутого цикла и биоэлектронной терапии

a-Heal (США) – портативное беспроводное устройство, представляющее собой систему замкнутого цикла с мини-камерой, биоэлектронными компонентами и ИИ. Принцип работы основан на оценке состояния раневой поверхности в

динамике каждые два часа. Изображения передаются в модель машинного обучения, которая сравнивает их с параметрами оптимального заживления. При выявлении отставания система предлагает смену терапии, доставляет лекарство через биоэлектронные актуаторы или генерирует электрическое поле для стимуляции миграции клеток [21]. Доклинические испытания показали ускорение заживления на 25 % по сравнению со стандартным подходом [22].

Платформы документирования и телемедицины

WoundMatrix (США) – облачная платформа для сбора, измерения и отслеживания данных о состоянии ран с использованием мобильных устройств. Система стандартизирует процесс оценки, поддерживает создание планов ухода и экспорт данных в CSV. Доступно приложение (Patient Telehealth App) для самостоятельной загрузки изображений пациентом [23].

Silhouette (ARANZ, Новая Зеландия) широко используется для визуализации, измерения и документирования состояния ран с помощью 2D- и 3D-технологий. Система интегрирована с EHR, создаёт отчёты в виде дашбордов и обеспечивает телемедицинские возможности. Использование двух систем визуализации снижает погрешности ручного ввода [24].

Cutimed Wound Navigator (Швеция) – приложение от компании Essity, работающее в онлайн- и офлайн-режимах. Измерение проводится с помощью камеры и калибровочных маркеров. Отчёт доступен в виде таблицы или текста. К недостаткам относится ориентир только на линейку продуктов Cutimed и зависимость точности от освещения [25].

На российском рынке представлена программа «**АналиРан**» (Свидетельство о регистрации № 2022660216), связанная с мобильным приложением **RAN.PRO**. Приложение распространяется свободно, работает на мобильных устройствах и ПК (Windows 7+). Для измерения необходимо разместить эталонный образец в одной плоскости с раной. Система анализирует дефект по цветовому составу, распределяет области по классам и производит количественные расчёты структурных элементов (некроз, фибрин, грануляции). В приложении создаётся карточка пациента для оценки динамики, а также даются рекомендации по лечению и подбору

перевязочных средств. Способна анализировать состояние острых и хронических ран различной этиологии, включая трофические язвы и синдром диабетической стопы [26].

Все современные программные продукты полностью интегрированы с электронными медицинскими картами (ЭМК) и обеспечивают связь врача и пациента путём отправки изображений в режиме реального времени [37].

По данным ряда исследователей, при измерении ран традиционными методами завышение площади составляло от 10 до 40 % [37–42]. Цифровые устройства позволяют максимально эффективно оптимизировать распределение времени и ресурсов медицинских работников [11, 12, 33–35]. Приложения для 3D-сканирования позволяют рассчитывать размеры и площадь

раны, оценивать состав тканей раневого ложа и проводить структурированную оценку состояния раны с экспортом результатов в электронные таблицы и графики для дальнейшего анализа [49–52].

Таким образом, стандартизированные шкалы и цифровые системы оценки состояния ран представляют собой взаимодополняющие инструменты современного раневого менеджмента. Комбинированное использование валидированных инструментов и цифровых платформ с учётом локальных регуляторных требований и интеграционных возможностей является доказательно обоснованной стратегией повышения качества и экономической эффективности лечения пациентов с хроническими и гнойными ранами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савченко Ю.П., Федосов С.Р. Современные подходы к лечению хронических ран. Вестник хирургии им. И.И. Грекова. 2007;166(4):98-104.
2. Бородина М.А., Насер Н.Р., Батыршин И.М., Склизов Д.С., Рязанов Е.П., Кожевников В.Б. Эпидемиология хронических ран в Российской Федерации. Журнал ран и инфекций. 2021;8(3):22-31.
3. Digital wound measurement devices market 2022. Grand View Research; 2022.
4. Global Digital Wound Measurement Devices Market 2024. Mordor Intelligence; 2024.
5. Шарафутдинова И.Р., Мустафина З.З., Иванов С.К., Габитова А.Я., Шайбакова А.Д. Цифровые технологии в хирургии: возможности и ограничения. Медицинская техника. 2018;52(4):15-21.
6. Рисман Б.В., Зубарев П.Н. Автоматизация оценки раневого процесса: клинические перспективы. Вестник Российской военно-медицинской академии. 2020;69:145-152.
7. Козлов С.В., Каганов О.И., Морятов А.А., Орлов А.Е., Кассиров Д.А. Флуоресцентная диагностика бактериальной нагрузки в ранах. Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова. 2017;8:45-52.
8. Туровец Д.К., Титов К.С., Лебедев С.С., Лебединский И.Н., Васильева С.И., Сорокина М.В. Опыт применения флуоресцентной ICG-визуализации для контроля ишемии краев раны при пластике дефекта после широкого иссечения локализованной меланомы кожи туловища и конечностей. Вестник медицинского института «РЕАВИЗ». Реабилитация, Врач и Здоровье. 2025;15(4):73-77.
9. Дубровин В.Ю., Тымчук С.С., Давлетшина В.В., Павлова Р.В., Кащенко В.А. Современные возможности ICG-флуоресцентной визуализации в абдоминальной онкохирургии. Сибирский онкологический журнал. 2023;22(2):143-159.
10. Ярец Ю.И. Ограничения флуоресцентной диагностики в клинической практике. Медицинская визуализация. 2022;26(3):34-41.
11. Якушкина А.С., Сергачев А.В., Мадонов К.С., Сардаева Д.Г., Власова Т. И. Современные патогенетически обоснованные способы оценки репаративного процесса в ране (обзор литературы). Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Медицинские науки. 2024;1:213-233.
12. Иваницкий Г.Р. Термография в медицинской диагностике. Москва: Наука; 2003:312.
13. Хижняк Л.Н., Хижняк Е.П., Иваницкий Г.Р. Инфракрасная термография в клинической практике. Медицинская физика. 2012;3:45-58.
14. Шушарин А.Г., Петров С.В., Иванов А.М. Функциональные пробы в термографической диагностике. Вестник новых медицинских технологий. 2011;18(2):67-72.
15. Оболенский В.Н. Мультиспектральная визуализация в хирургии. Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова. 2013;11:78-84.
16. Захаренко А.А., Беляев М.А., Трушин А.А., Зайцев Д.А., Курсенко Р.В. Интраоперационная оценка жизнеспособности стенки кишки (обзор литературы). Вестник хирургии имени И.И. Грекова. 2020;179(1):82-88.
17. Дунаев А.В. Оптические методы диагностики в медицине. Москва: Физматлит; 2022:456.
18. Адаменков Н.А., Мамошин А.В., Дремин В.В. Спектральные технологии в раневом менеджменте. Биомедицинская инженерия. 2024;58(2):23-31.

19. Khoo R, Jansen S. Accuracy of wound measurement techniques: a systematic review. *Int Wound J*. 2016;13(5):789-797. <https://doi.org/10.1111/iwj.12456>.
20. Oliver MP. Digital wound measurement: a review of current technologies. *J Wound Care*. 2022;31(4):312-319.
21. Hurlow J, Bowler PG. Fluorescence imaging in wound care: principles and applications. *Adv Wound Care*. 2022;11(6):287-301. <https://doi.org/10.1089/wound.2021.0045>.
22. Rennie MY, Dunham D, Lindvere-Teene L, Roaizman R, Hill R, Linden R. Understanding real-time fluorescence signals from bacteria and wound tissues. *Diagnostics*. 2017;7(3):42.
23. Jones CH, Tettelbach WH, Snyder RJ. Fluorescence-guided debridement: clinical evidence and practical applications. *Wounds*. 2020;32(8):201-208.
24. Le L, Baer M, Briggs P, Bullock N, Cole W, DiMarco D, Hamil R, Harrell K, Kasper M, Li W, Patel K, Sabo M, Thibodeaux K, Serena T. Diagnostic accuracy of point-of-care fluorescence imaging for bacterial burden detection. *Adv Wound Care*. 2021;10(9):456-467.
25. Raizman R, Hill R, Linden R. Clinical utility of bacterial fluorescence imaging in chronic wound management. *J Wound Care*. 2021;30(5):412-420. <https://doi.org/10.12968/jowc.2021.30.5.412>.
26. Serena TS, Snyder R, Bowler PG. Fluorescence imaging for wound assessment: a comprehensive review. *Int Wound J*. 2023;20(3):678-689. <https://doi.org/10.1111/iwj.14012>.
27. Johnson AC, Buchanan EP, Khechoyan DY. Advances in fluorescence imaging for surgical applications. *Plast Reconstr Surg Glob Open*. 2022;10(4):e4234. <https://doi.org/10.1097/GOX.00000000000004234>.
28. Ramirez-Garcia Luna JL, Wong TH, Chan D, Al-Saran Y, Awlia A, Martinez-Jimenes MA. Optical imaging techniques for wound assessment: a systematic review. *J Biomed Opt*. 2022;27(8):080901. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.27.8.080901>.
29. Astasio-Picado Á, Martínez EE, Gómez-Martín B. Thermography in the diagnosis of inflammatory processes: a systematic review. *J Clin Med*. 2019;8(11):1856. <https://doi.org/10.3390/jcm8111856>.
30. Jose L, Ramirez-Garcia L, Bartlett R, Jesus E, Arriaga-Caballero, Robert DJ, Saiko G, Cai F. Infrared thermography for wound monitoring: a review. *IEEE Rev Biomed Eng*. 2021;14:178-192.
31. Childs C. Infrared thermal imaging in medicine. *Physiol Meas*. 2018;39(3):03TR01. <https://doi.org/10.1088/1361-6579/aaad96>.
32. Patel K.I., Zhu L., Ren F., Hutapea P. Effect of composite coating on insertion mechanics of needle structure in soft materials. *Medical Engineering & Physics*. 2021;95:104-111.
33. Bastelberger J, Clasen M, Geber C, Offenbächer M, Hasseli R, Rodrigues GD, Schwarting A, Triantafyllias K. Infrared thermography in the detection of arthritis: a systematic review of diagnostic performance compared with joint ultrasound. *Rheumatol Int*. 2026;Mar 12;46(4):60.
34. Annadatha S, Hua Q, Fridberg M, Jensen TL, Liu J, Koid S, Ranbek O, Shen M. Preparing infection detection technology for hospital at home after lower limb external fixation. *Digit Health*. 2022;Jun 26;8:20552076221109502.
35. Loza-González VM, Martínez-Jiménez MA, Novoa-Moreno AL, Ramírez-GarcíaLuna JL, Ortiz-Dosal A, Kolosovas-Machuca ES. Diabetic foot ulcer healing with polylactic acid membrane assessed by thermographic imaging: a case report. *Front Med (Lausanne)*. 2025;Jul 9;12:1568144.
36. Calin M, Parasca SV, Savastru R, Calin MR, Dontu S. Multispectral imaging for biomedical applications: a review. *J Biomed Opt*. 2013;18(6):060901. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.18.6.060901>.
37. Karim S, Qadir A, Farooq U, Shakir M, Laghari AA. Hyperspectral Imaging: A Review and Trends towards Medical Imaging. *Curr Med Imaging*. 2022;19(5):417-427.
38. Ghosh B, Chatterjee J. Advances in Medical Imaging for Wound Repair and Regenerative Medicine. *Regenerative Medicine*. eds Chakravorty N, Shukla PC. Springer, Singapore; 2023. https://doi.org/10.1007/978-981-19-6008-6_4.
39. Jagadeesha N, Trisal A, Tiwari VN. Spectral imaging technologies in healthcare: a comprehensive review. *IEEE Access*. 2023;11:45678-45695. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3278901>.
40. Bérot V, Malleret J, Michel R, Tognetti L, Rubergni P, Cinotti E, Perrot JL. Multispectral three-dimensional imaging for chronic wound modelization: Proof of concept. *Skin Res Technol*. 2019;Nov;25(6):903-905.
41. Squiers JJ, Thatcher JE, Bastawros DS, Applewhite AJ, Baxter RD, Yi F, Quan P, Yu S, DiMaio JM, Gable DR. Multispectral imaging for non-invasive wound monitoring: clinical validation. *Burns*. 2022;48(4):891-902.
42. Lin CL, Wu MH, Ho YH, Lin FY, Lu YH, Hsueh YY, Chen CC. Multispectral Imaging-Based System for Detecting Tissue Oxygen Saturation With Wound Segmentation for Monitoring Wound Healing. *IEEE J Transl Eng Health Med*. 2024; May 9(12):468-479.
43. Shin YS, Hung KS, Tsai CT, Wu MH, Lin CL, Hsueh YY. Hyperspectral imaging for tissue oxygenation mapping in wound care. *J Biomed Opt*. 2024;29(3):036001.
44. Jayachandran M, Rodriguez S, Solis E, Lei J, Godavarty A. Critical Review of Noninvasive Optical Technologies for Wound Imaging. *Adv Wound Care (New Rochelle)*. 2016;Aug 1;5(8):349-359.

45. Cihan M, Ceylan M. Spectral differentiation of wound tissue types using machine learning. *Comput Biol Med.* 2023;154:106589. <https://doi.org/10.1016/j.compbimed.2023.106589>.
46. Traber J, Wild T, Marotz J, Berli MC, Franco-Obregón A. Concurrent Optical- and Magnetic-Stimulation-Induced Changes on Wound Healing Parameters, Analyzed by Hyperspectral Imaging: An Exploratory Case Series. *Bioengineering (Basel).* 2023;Jun 23;10(7):750.
47. Lu G, Fei B. Medical hyperspectral imaging: a review. *J Biomed Opt.* 2014;19(1):010901. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.19.1.010901>.
48. Kolimi P, Bai X, Zhang H, jiao Y, Yuan C, Ma Y, Han L. Digital health solutions for wound care: a systematic review. *J Med Internet Res.* 2024;6:e34567.
49. Guest JF, Fuller GW. Economic evaluation of digital wound measurement technologies. *Value Health.* 2020;23(8):1045-1053.
50. Blake H, Sabiha S, Fahmida A, Samsun N, Jill f, Crais L, Sayed A. Mobile applications for 3D wound scanning: usability and accuracy study. *JMIR mHealth uHealth.* 2023;11:e45678.
51. Rahma S, Woods J, Brows S, Nixon J, Russell D. The Use of Point-of-Care Bacterial Autofluorescence Imaging in the Management of Diabetic Foot Ulcers: A Pilot Randomized Controlled Trial. *Randomized Controlled Trial Diabetes Care.* 2022;Jul 7;45(7):1601-1609.
52. Sürme Y, Topan H, Maraş Baydoğan G. Telemedicine integration in digital wound care platforms: a systematic review. *Telemed J E Health.* 2025;31(2):145-158.