Гиперспектральная система визуализации и анализа ожогов

М. С. Шатковская*, Н. М. Соколов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

*margosh86@gmail.com

***Аннотация*. Оценка глубины и степени повреждения ожогов является критически важной задачей в комбустиологии, поскольку она определяет тактику лечения, необходимость хирургического вмешательства и прогноз восстановления пациента. Традиционные методы диагностики, включая визуальный осмотр, лазерную допплеровскую флоуметрию и инфракрасную термографию, обладают рядом ограничений, таких как субъективность, невысокая точность и ограниченная глубина проникновения. В данной работе будет рассмотрен перспективный метод объективной оценки ожоговых повреждений с использованием гиперспектральной визуализации (HSI). Технология HSI позволяет анализировать спектральные характеристики тканей, определять уровень оксигенации, микроциркуляции и водного баланса, что делает ее мощным инструментом для ранней диагностики и прогноза заживления ран. В работе рассматриваются принципы работы гиперспектральных систем, их преимущества по сравнению с традиционными методами, а также перспективы клинического применения. Внедрение гиперспектрального анализа в комбустиологию может значительно повысить точность диагностики, сократить число ошибочных оценок глубины ожогов и снизить потребность в инвазивных методах обследования.**

Ключевые слова: гиперспектральная визуализация, диагностика ожогов, гиперспектральный сканер, неинвазивная диагностика, медицинская визуализация, оценка глубины ожога, спектральный анализ, оптические методы диагностики

I. Введение

Повреждения поверхностных тканей, включая ожоги, ссадины, порезы, отморожения требуют точного диагностирования для выбора оптимальной тактики лечения. Ошибки, допущенные во время диагностики, могут привести к лишним хирургическим вмешательствам или, наоборот, к задержке необходимого лечения, что в свою очередь увеличивает риск осложнений, включая инфекции, некроз тканей и формирование рубцов.

Традиционные методы, такие как визуальный осмотр, пальпация и оценка капиллярной реакции, остаются основными инструментами врачей, но их точность варьируется от 60 до 75 %, что делает диагностику субъективной и зависимой от опыта специалиста [3]. Это особенно актуально при дифференциации поверхностных и глубоких повреждений, когда отсутствие четкой границы между ними усложняет принятие выбора способа лечения. Так, поверхностные ожоги могут заживать самостоятельно, в то время как глубокие требуют хирургического лечения. Изменчивость состояния поврежденных тканей во времени является одной из ключевых проблем диагностики, особенно в случаях ожогов.

Несвоевременное выявление глубины ожогов и некротических изменений приводит к ненужным хирургическим вмешательствам в 20–30 % случаев, в то время как, наоборот, недооценка тяжести повреждений повышает риск инфицирования и некроза тканей. [3] Ожоги и другие повреждения кожи могут возникать в результате термического, химического, электрического или радиационного воздействия, а также в условиях экстремальных температур и техногенных катастроф. Дополнительным фактором, увеличивающим число тяжёлых кожных поражений, являются боевые действия, где глубокие ожоги и травматические раны требуют быстрой и точной диагностики для предотвращения осложнений. В таких условиях особенно важно разрабатывать новые методы анализа повреждений, которые позволят врачам оперативно и точно оценивать степень и глубину поражения тканей, прогнозировать заживление и подбирать оптимальную тактику лечения.

Современные технологии визуализации, такие как гиперспектральный анализ, могут сыграть ключевую роль в улучшении диагностики и повышении эффективности медицинской помощи.

II. Обзор методов диагностики ожогов

Эффективная диагностика ожогов играет ключевую роль в выборе стратегии лечения и прогнозировании исхода повреждений. Существует несколько методов, применяемых в клинической практике, каждый из которых имеет свои преимущества и ограничения. Традиционные методы, такие как визуальная оценка, термография и лазерная доплеровская флоуметрия, широко используются, но могут давать субъективные или ограниченные результаты [3, 4]. Гиперспектральная визуализация (HSI) обеспечивает более точный и объективный анализ состояния тканей [1, 2]. Этот метод позволяет неинвазивно оценивать уровень оксигенации, степень васкуляризации и глубину повреждений, что особенно важно при сложных ожогах. В таблице 1 ниже представлен сравнительный анализ различных методов диагностики ожогов по ключевым параметрам: точность, неинвазивность и глубина анализа. Точность методов сравнивается с биопсией, как наиболее точным методом, и определяется двумя ключевыми параметрами: чувствительностью (способностью правильно выявлять глубокие ожоги) и специфичностью

(способностью исключать ложноположительные результаты, когда ожог не требует пересадки кожи).

ТАБЛИЦА I. СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ОЖОГОВ

Метод диагностики	**Точность**	**Неинвазивность (1-5)**	**Глубина**	**Основной принцы**
Визуальная оценка	Нет информации	5	0 мм	Осмотр врачом
Лазерная доплеровская флоуметрия	чувствительность (83–88%) специфичность (78–85%)	4	1–2 мм	Оценка кровотока
Инфракрасная термография	чувствительность (81,52%) специфичность (90,21%)	5	0,5–1 мм	Температурный анализ
Биопсия и гистология	стандарт	1	до 4 мм и более	Лабораторный анализ тканей
Гиперспектральная визуализация (HSI)	чувствительность (81-85%) специфичность (88–90.21%)	5	1–2 мм (видимый диапазон) до 4 мм (ближний инфракрасный)	Анализ спектральных характеристик тканей

Гиперспектральная визуализация (HSI) превосходит традиционные методы диагностики ожогов благодаря высокой информативности и объективности анализа. В отличие от визуальной оценки, которая субъективна и зависит от опыта врача, HSI предоставляет количественные данные о состоянии тканей, снижая вероятность диагностических ошибок. Лазерная допплеровская флоуметрия, оценивая только кровоток, не позволяет определить степень повреждения тканей и глубину ожога, тогда как HSI анализирует спектральные характеристики, выявляя оксигенацию, микроциркуляцию и водный баланс. Инфракрасная термография регистрирует лишь температурные аномалии, не различая причин их возникновения, тогда как HSI анализирует физиологические и структурные изменения тканей. Биопсия и гистология, являясь золотым стандартом диагностики, требуют инвазивного вмешательства и времени на обработку материала, тогда как HSI позволяет быстро и неинвазивно получать аналогичные диагностические данные. Таким образом, гиперспектральная визуализация сочетает в себе преимущества всех методов, обеспечивая точную, неинвазивную и объективную оценку ожогов.

HSI позволяет дифференцировать ожоги по степени поражения и прогнозировать их заживление. Это делает метод более информативным и полезным для клинической диагностики. HSI выделяется среди рассмотренных методов, поскольку сочетает неинвазивность, высокую точность и возможность анализа как поверхностных, так и глубоких поражений. Это делает её перспективным инструментом для применения в клинической практике.

III. ПРИМЕНЕНИЕ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ В ДИАГНОСТИКЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ ТКАНЕЙ

Гиперспектральная визуализация (HSI) – это метод анализа тканей, основанный на измерении спектральных характеристик в широком диапазоне длин волн [1, 2]. Данный подход позволяет выявлять физиологические и структурные изменения в тканях, что делает его перспективным для диагностики ожогов. HSI регистрирует отражение и поглощение света тканями в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. На основе этих данных строятся карты оксигенации, перфузии, глубины поражения и состояния кожных покровов.

Оксигенация тканей оценивается в диапазоне 500–600 нм и 750–800 нм, так как оксигемоглобин и дезоксигемоглобин поглощают свет по-разному, что позволяет определять уровень кислородного насыщения [7]. Глубокие ожоги часто сопровождаются ишемией, что приводит к снижению оксигенации и отличается в спектре от здоровых тканей (**р**ис**.** 1: динамика изменений в тканях после облучения в различных спектральных диапазонах).

Анализ содержания воды проводится в ближнем инфракрасном диапазоне 970–990 нм, так как у воды есть характерные пики поглощения в этом диапазоне [9]. Поверхностные ожоги сопровождаются воспалительным отёком, что увеличивает гидратацию тканей, тогда как глубокие ожоги теряют воду из-за коагуляционного некроза.

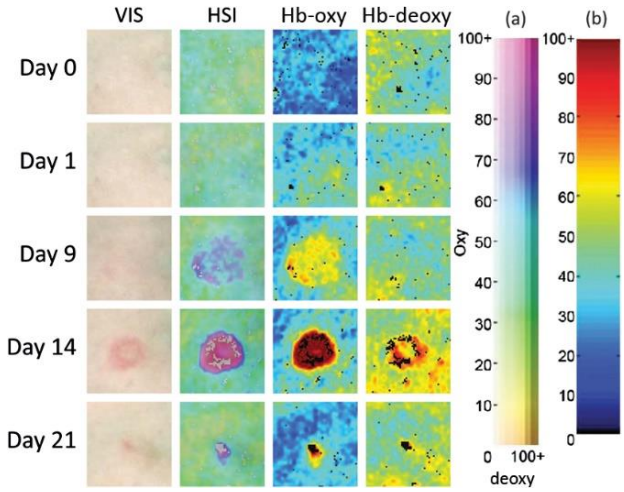

Рис. 1. Видимые (VIS), гиперспектральные селективные (HSI), селективные к оксигемоглобину (Hb-oxy) и селективные к дезоксигемоглобину (Hb-deoxy) окна в выбранные дни после облучения для представительного субъекта. Области воспроизведены в масштабе 100%. Для интерпретации окна HSI предоставлена двойная шкала (a). Для окон Hb-oxy и Hb-deoxy используется одиночная шкала (b)

Оценка микроциркуляции в диапазоне 600–850 нм позволяет определить уровень кровоснабжения повреждённой ткани: при поверхностных ожогах капилляры сохраняются, а при глубоких они разрушаются, что приводит к отсутствию кровотока и изменению спектральных характеристик.

Содержание меланина анализируется в диапазоне 400–600 нм, так как этот пигмент сильно поглощает свет в синей и зелёной областях спектра. Ожоги могут приводить к разрушению меланоцитов, что влияет на уровень поглощения в этом диапазоне и может использоваться для оценки долгосрочных изменений, таких как рубцевание или депигментация (рис. 2: Нормированная спектральная плотность мощности обратного рассеяния тканей кожи).

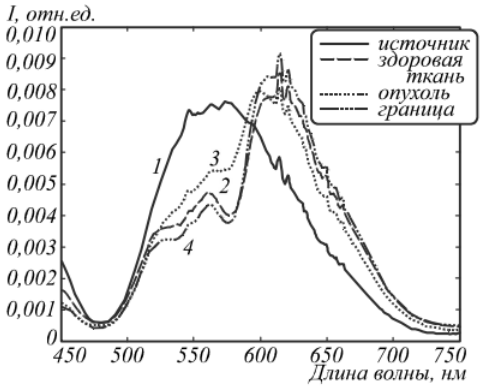

Рис. 2. Нормированная спектральная плотность мощности обратного рассеяния тканей кожи: 1 – меланома, 2 –здоровая кожа, 3 – граница нормальной кожи и меланомы,4 – спектр LED-лампы [11]

Структурные изменения тканей оцениваются в диапазоне 600–700 нм, так как белковые соединения и коллаген изменяют свои оптические свойства при термическом повреждении, что позволяет выявлять коагуляционный некроз и прогнозировать необходимость хирургического удаления тканей.

Использование этих параметров в гиперспектральной визуализации позволяет неинвазивно определять глубину ожогов, прогнозировать их заживление и различать ткани, требующие трансплантации, что делает этот метод ценным инструментом в комбустиологии.

IV. Заключение

Гиперспектральная визуализация представляет собой перспективный метод в диагностике ожогов, позволяющий детально анализировать структуру тканей. В отличие от традиционных методов, таких как визуальный осмотр или термография, HSI предоставляет объективные количественные данные, что повышает точность определения глубины повреждений и снижает риск субъективных ошибок. Применение данного подхода способствует раннему прогнозированию заживления, улучшению тактики лечения и минимизации инвазивных вмешательств. Дальнейшее развитие технологии направлено на повышение скорости обработки данных, интеграцию с искусственным интеллектом и создание портативных решений для клинического использования. Расширение применения гиперспектрального анализа в медицине откроет новые возможности не только в комбустиологии, но и в смежных областях, таких как дерматология, онкология и реконструктивная хирургия.

Список литературы

[1] Guolan Lua, Baowei Fei Medical hyperspectral imaging: a review // Journal of Biomedical Optics. 2014.

[2] Schulz T., Marotz J., Seider S., Langer S., Leuschner S., Siemers F. Burn depth assessment using hyperspectral imaging in a prospective single center study // Burns. 2021. T. 49, №8. C. 1093-1096.

[3] Monstrey S., Hoeksema H., Verbelen J., Pirayesh A., Blondeel P. Assessment of burn depth and burn wound healing potential // Burns. 2008. T. 34, №6. C. 761-769.

[4] Stewart T.L., Ball B., Schembri P.J., Hori K., Ding J., Shankowsky H.A., Tredget E.E. The Use of Laser Doppler Imaging as a Predictor of Burn Depth and Hypertrophic Scar Postburn Injury // Burns. 2012. T. 27, №1. C. 764-771.

[5] Dang J., Lin M., Tan C., Pham C.H., Huang S., Hulsebos I.F., Yenikomshian H., Gillenwater J. Use of Infrared Thermography for Assessment of Burn Depth and Healing Potential: A Systematic Review // Burns. 2021. T.42, №6. C. 1120–1127.

[6] Shupp J.W., Nasabzadeh T.J., Rosenthal D.S., Jordan M.H., Fidler P., Jeng J.C. A review of the local pathophysiologic bases of burn wound progression // Burns. 2010. T. 36, №2. C. 152-160.

[7] Chin M.S., Freniere B.B., Lo Y.-C., Saleeby J.H., Baker S.P., Strom H.M., Ignotz R.A., Lalikos J.F., Fitzgerald T.J. Hyperspectral imaging for early detection of oxygenation and perfusion changes in irradiated skin // Journal of Biomedical Optics. 2012.

[8] Afara I.O., Shaikh R., Nippolainen E., Querido W., Torniainen J., Sarin J.K., Kandel S., Pleshko N., Töyräs J. Characterization of connective tissues using near-infrared spectroscopy and imaging // Nature Protocols. 2021.

[9] Michael G. Sowa, Jeri R. Payette, Henry H. Mantsch.D. Near-Infrared Spectroscopic Assessment of Tissue Hydration Following Surgery//Journal of Surgical Research. 1999. 62-69.

[10] Promny D., Aich J., Billner M., Reichert B. First preliminary Clinical Experiences using Hyperspectral Imaging for Burn Depth Assessment of Hand Burns. // Journal of Burn Care & Research. 2021.

[11] Bratchenko I., Myakinin O., Alonova M. Hyperspectral visualization of skin pathologies in visible region // Computer Optics 40(2):240-248.