

Оптические сенсорные системы для неинвазивных медико-биологических исследований

© А.Ю. Зайцева, М.С. Мазинг

Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: anpa@da-24.ru

Поступило в Редакцию 18 мая 2023 г.

В окончательной редакции 4 июля 2023 г.

Принято к публикации 30 октября 2023 г.

Рассмотрены основные принципы метода оценки функционального состояния человека посредством изучения отклика микроциркуляторного русла на нагрузку. Проведена неинвазивная оценка нарушений микроциркуляторного русла при проведении функциональной пробы с локальной ишемией при помощи разработанного аппаратно-программного комплекса, основанного на методе ближней инфракрасной спектроскопии.

Ключевые слова: оптические датчики, ближний ИК-диапазон, микроциркуляция, функциональное состояние.

DOI: 10.61011/PJTF.2023.23.56844.201A

Функциональное состояние и функциональный резерв человека являются важными показателями, характеризующими защищенность организма от возникновения различных заболеваний сердечно-сосудистой системы. Отклонение от нормы в ее основных показателях является признаком ухудшения функционального состояния организма в целом, поэтому так важна своевременная диагностика данной системы. Кожа представляет собой традиционно доступный в клинической практике объект для функциональной диагностики состояния микроциркуляторного русла (МЦР) [1]. Известно, что локальный кровоток, зарегистрированный в коже, довольно точно отражает общие закономерности ответных реакций на различные физиологические стимулы (стресс, мышечные нагрузки, температурные градиенты) всего МЦР в целом, поэтому его исследование является доступным объектом для диагностики сосудистых адаптивных реакций всего организма [2].

Ближняя инфракрасная спектроскопия (NIRS) была впервые описана еще в 1977 г. как средство оценки физиологии сосудов головного мозга [3]. По сути, эта технология основана на способности ближнего ИК-излучения (650–950 nm) проникать глубоко в ткани и частично поглощаться физиологическими хромофорами (гемоглобин, миоглобин, цитохром и др.), что позволяет определять насыщение тканевого гемоглобина кислородом [4].

Целью настоящей работы является неинвазивная оценка нарушений МЦР при проведении функциональной пробы с локальной ишемией при помощи разработанного аппаратно-программного комплекса, основанного на методе NIRS-спектроскопии.

В качестве датчика использовался неинвазивный тканевый оксиметр, разработанный в Институте аналитического приборостроения РАН (Санкт-Петербург). Прибор представлял собой источник и детектор излучения

видимого и ближнего ИК-диапазона, работающий на 18 длинах волн (410, 435, 460, 485, 510, 535, 560, 585, 610, 645, 680, 705, 730, 760, 810, 860, 900, 940 nm), снабженный микропроцессорным устройством для обработки и визуализации данных (рис. 1).

Спектр излучения оптической сенсорной системы на основе NIRS представлен на рис. 2.

С помощью спектрофотометрического канала прибора оценивалось объемное кровенаполнение микроциркуляторного русла ткани в зоне измерения. Оценка осуществлялась по методологии абсорбционной спектроскопии светорассеивающих и поглощающих излучение сред. Поскольку микроциркуляторные расстройства не всегда проявляются в условиях покоя, для выявления скрытых нарушений микроциркуляции требовалось выполнение функциональных нагрузочных проб.

В экспериментальном исследовании принимали участие 20 условно здоровых испытуемых в возрасте 20 лет как мужского, так и женского пола. Во время экспериментального исследования испытуемые находились в положении сидя. После 1 min в состоянии покоя без прерывания записи производилась окклюзионная проба. Через 3 min происходил сброс давления в манжете, и регистрация измерений производилась еще 4 min (пост-окклюзионный период). Таким образом, общее время проведения пробы занимало 8 min для каждого испытуемого. Основное назначение окклюзионной пробы как функциональной нагрузки заключалось в провокации сосудистых реакций. Создавалась кратковременная блокировка венозного и/или артериального кровотока конечности манжетой тонометра. Производился анализ взаимосвязей между перфузией и параметрами, характеризующими процессы метаболизма в биоткани [5,6]. При этом при проведении окклюзионной пробы резервные возможности систем оценивались по приросту показате-

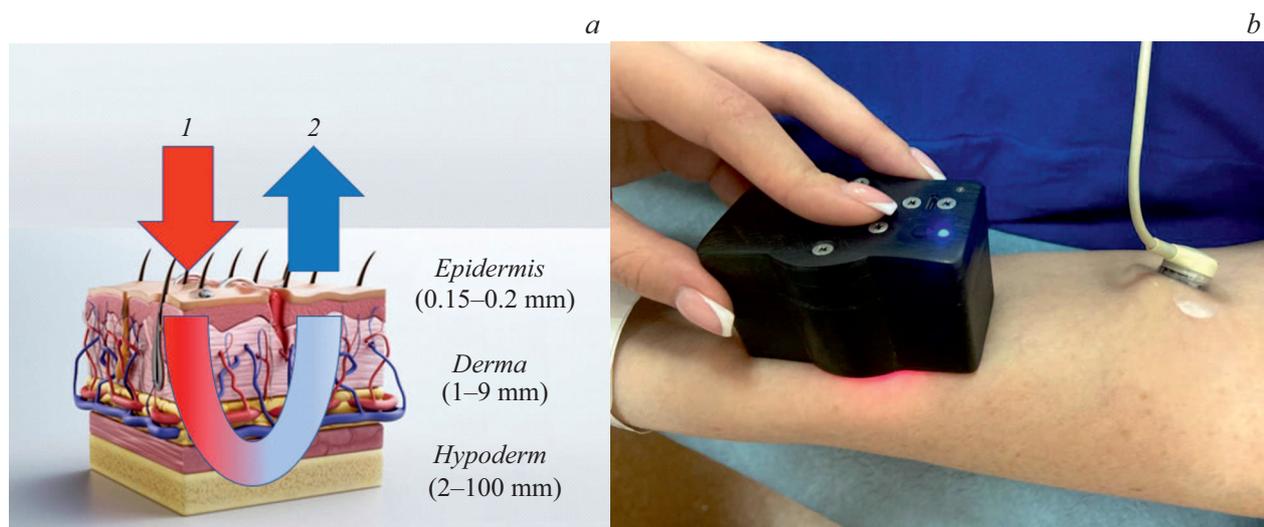


Рис. 1. *a* — схематическое изображение принципа работы оптической сенсорной системы на основе NIRS. *1* — источник излучения, *2* — детектор. *b* — использованный неинвазивный тканевый оксиметр (Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург).

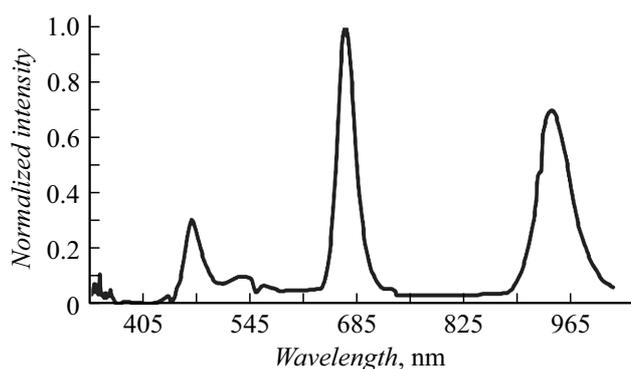


Рис. 2. Спектр излучения оптической сенсорной системы на основе NIRS.

лей микроциркуляции крови, происходящему во время постокклюзионной гиперемии [7].

Были получены значения параметров обратнорассеянного в биологических тканях излучения видимого и ближнего ИК-диапазона длин волн для каждого из испытуемых до, во время и после функциональной нагрузки. Показатели отклика тканей для каждого испытуемого позволили отразить информацию о кислородном обеспечении и динамике изменений параметров МЦР у обследуемых за весь период экспериментального исследования. Дальнейшая обработка результатов эксперимента проводилась с использованием программного комплекса анализа данных. Были построены диаграммы, представляющие собой набор численных значений отклика сенсоров по длинам волн в условных единицах. Зарегистрированные изменения показателей микроциркуляции для различных длин волн и во времени для типичного испытуемого приведены на рис. 3.

В ходе анализа результатов экспериментальных исследований были выявлены индивидуальные типологические особенности состояния тканевого кровотока, которые отражали вегетативный статус испытуемых. Показано, что значения интенсивностей обратнорассеянного излучения на выбранных длинах волн существенно снижаются во время окклюзии и восстанавливаются до уровня значений в состоянии покоя и выше (рис. 3, *a*). При этом степень выраженности искусственной ишемии конечности, которую можно наблюдать по постепенному снижению значений показателей датчиков разработанной оптической системы во время действия окклюзии, у всех испытуемых являлась схожей. Восстановление же кровотока в артериях конечностей у испытуемых происходило с разной динамикой. Это свидетельствует о том, что реакция микроциркуляторного русла на окклюзионный тест у испытуемых не является одинаковой. Также важным показателем является резерв кровотока, который можно определить по разнице показаний датчика до и после окклюзии. Резерв кровотока — это изменение объемного кровенаполнения от минимальных значений во время окклюзии до максимальных во время постокклюзионной гиперемии. Данный параметр можно определить по разнице показателей оптических датчиков системы у испытуемого в начальном состоянии и после функциональной нагрузки. Графический метод определения резервного кровотока представлен на рис. 3, *b*. Повышенное значение этого параметра может свидетельствовать о нарушении кровообращения, в частности о наличии патологического сужения просвета в сосудах из-за неполноценного сокращения их стенок. Пониженный показатель резерва кровотока может наблюдаться при застойных явлениях в сосудах. Помимо этого адапционный резерв капиллярного кровотока

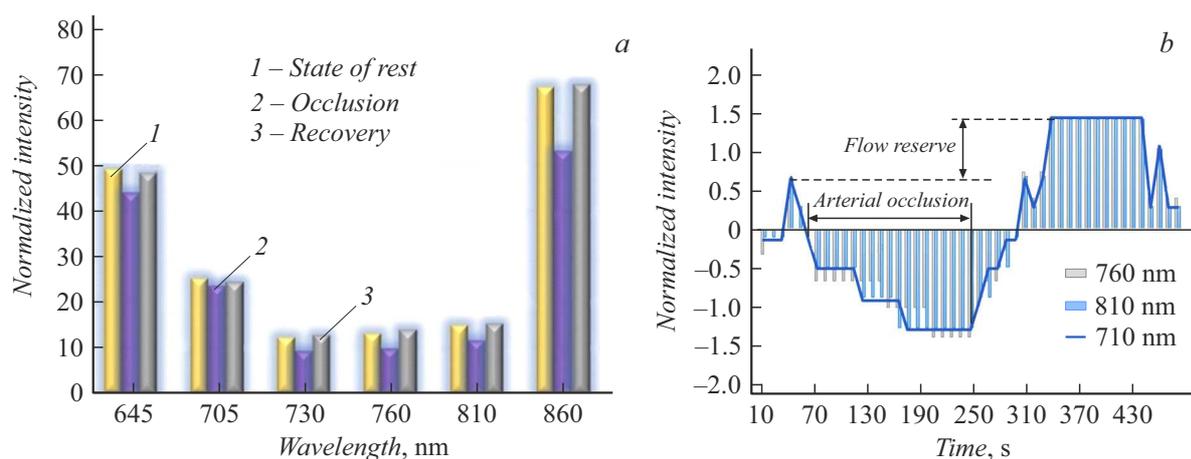


Рис. 3. Изменения показателей микроциркуляции при проведении нагрузочной функциональной пробы (окклюзии) верхних конечностей. Тканевый кровоток для различных длин волн ближнего ИК-диапазона (a) и его изменение во времени (b).

характеризует тип микроциркуляторного русла, поэтому данный параметр может быть использован не только для оценки состояния системы микроциркуляции крови, но и в качестве критерия, позволяющего достоверно выявлять индивидуально-типологические особенности микроциркуляции и микрогемодинамики человека с последующей оценкой проявления развития патологических процессов.

Анализируя результаты исследований, можно отметить эффективность разработанного метода оценки состояния микроциркуляции с целью оценки компенсаторно-восстановительных реакций, функционального состояния и работоспособности человека.

Финансирование работы

Исследование выполнено в рамках государственного задания № 075-01157-23-00.

Соблюдение этических стандартов

Все процедуры, выполненные в исследовании с участием людей, соответствуют этическим стандартам институционального и национального комитета по исследовательской этике и Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующим изменениям или сопоставимым нормам этики. От каждого из включенных в исследование участников было получено информированное добровольное согласие.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J.A. Kim, D.J. Wales, G.Z. Yang, *Prog. Biomed. Eng.*, **2** (4), 042001 (2020). DOI: 10.1088/2516-1091/abaaa3

- [2] L.A. Holowatz, C.S. Thompson-Torgerson, W.L. Kenney, *J. Appl. Physiol.*, **105** (1), 370 (2008). DOI: 10.1152/jappphysiol.00858.2007
- [3] F.F. Jöbsis, *Science*, **198** (4323), 1264 (1977). DOI: 10.1126/science.929199
- [4] A. Cheung, L. Tu, A. Macnab, B.K. Kwon, B. Shadgan, *J. Biomed. Opt.*, **27** (7), 077001 (2022). DOI: 10.1117/1.JBO.27.7.077001
- [5] H. Knotzer, W.R. Hasibeder, *Physiol. Meas.*, **28** (9), R65 (2007). DOI: 10.1088/0967-3334/28/9/R01
- [6] R.S. Loomba, J. Rausa, D. Sheikholeslami, A.E. Dyson, J.S. Farias, E.G. Villarreal, S. Flores, R.A. Bronicki, *Pediatr. Cardiol.*, **43** (1), 197 (2022). DOI: 10.1007/s00246-021-02718-7
- [7] K.-D. Lin, B.-S. Lin, G.-A. Lin, B.-S. Lin, *IEEE Sens. J.*, **21** (8), 10167 (2021). DOI: 10.1109/JSEN.2021.3058717