

fNIRS в исследовании мышечной усталости: перспективы в спорте и медицине

Я. С. Касьянова¹, Д. А. Егоров²

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

¹ kasyanovaya02@gmail.com, ² staer39@gmail.com

Аннотация. Работа посвящена изучению особенностей явления мышечной усталости с использованием метода функциональной спектроскопии в ближнем инфракрасном спектре. Мышечная усталость – физиологический параметр, характеризующий временное ухудшение способности мышц сокращаться. Регистрация изменения оптической плотности тканей, являющейся следствием увеличения потребности мышц в кислороде и питательных веществах, позволит оценить их текущее состояние. Умеренная нагрузка способствует укреплению мышц при последующем восстановлении. Однако чрезмерные и сверхинтенсивные тренировки могут вызвать перенапряжение, что повышает риск травмирования. Для повышения эффективности и безопасности выполняемых упражнений, важно своевременно производить оценку мышечного состояния.

Ключевые слова: мышечная усталость; функциональная спектроскопия в ближнем инфракрасном спектре; fNIRS; спорт; реабилитация; оксигенация тканей

I. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день люди становятся все более заинтересованными в контроле здоровья. Одним из ключевых аспектов здорового образа жизни является регулярная физическая активность, которая способствует укреплению мышц, улучшению общего самочувствия и профилактике различных заболеваний. Однако важно иметь представление о допустимости уровня выполняемой нагрузки и ее интенсивности, чтобы избежать мышечной усталости и не допустить повышения риска травмирования. Существуют две основные причины, способные вызвать чрезмерное мышечное перенапряжение:

- Сверхинтенсивные тренировки – усталость после физической нагрузки носит временный характер.
- Заболевания, вызывающие дегенеративные изменения в мышечных структурах (полимиозит, боковой амиотрофический склероз, сахарный диабет и т.д. [1]) – с течением времени мышечное состояние не изменяется и необходимо проведение реабилитационных мероприятий.

Оценка мышечной усталости может быть произведена посредством следующих методов регистрации:

- пЭМГ (поверхностная электромиография) – регистрация электрических потенциалов с поверхности кожи, вызванных мышечными сокращениями.

- ММГ (механомиография) – регистрация мышечных вибраций, издаваемых во время механического сокращения [2, 3].
- fNIRS (функциональная спектроскопия в ближнем инфракрасном спектре) – регистрация изменения гемодинамики в мышцах, а именно, изменение концентраций окси- и дезокси-гемоглобина.

В основе большинства устройств, предназначенных для оценки мышечной усталости, лежит пЭМГ. Для регистрации сигнала необходимо использование электродов и токопроводящего геля, что может вызвать раздражение кожи (особенно при повышенном потоотделении при занятии спортом). Поэтому ЭМГ методики являются неудобным решением для носимого устройства [4]. Еще одной сложностью работы с пЭМГ является ее интерпретация: сигнал описывает лишь электрическую проводимость ткани. Считается, что более объективным методом контроля является отслеживание потребляемого кислорода, который косвенно характеризует работу мышц, что и реализовано методом fNIRS,

II. МЕТОДОЛОГИЯ fNIRS

Суть метода заключается в воздействии излучением ближнего инфракрасного спектра (700–1000 нм) на исследуемый участок ткани и регистрации ее оптической плотности, которая определяется различным содержанием воды, гемоглобина, липидов и т.д. На рис. 1 схематично изображены методы регистрации ФПГ и fNIRS. Принципиальным отличием методов является глубина проникновения излучения: ФПГ – дерма, fNIRS – мышцы.

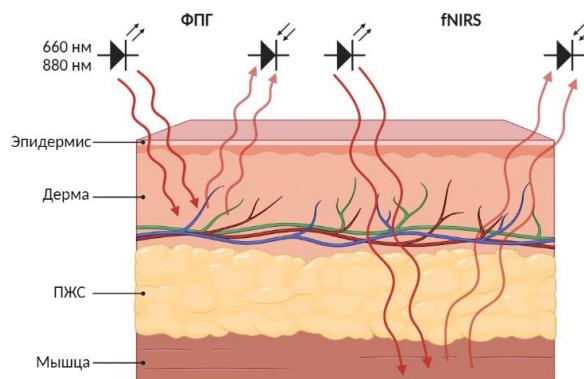


Рис. 1. Распространение оптического излучения через исследуемую ткань для методов ФПГ и fNIRS

Во время физической активности гемодинамика в мышечной ткани ускоряется, что объясняется

необходимостью в большем количестве кислорода и выведения продуктов синтеза. Изменение локальной концентрации гемоглобина приводит к изменению поглощения БИК-излучения, который описывается законом Бера–Ламберта. Пик спектра поглощения оксигемоглобина $\lambda > 800$ нм, а дезоксигемоглобина – $\lambda < 800$ нм. Однако кислород также входит в состав воды, находящейся в клетках исследуемой ткани. Для корректировки расчетов и оценки кислорода непосредственно в мышцах, целесообразно использование дополнительного источника излучения с длиной волны $\lambda > 1000$ нм, соответствующего пику поглощения воды.

III. РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА УСТРОЙСТВА

Для исследования мышечной усталости был разработан портативный прототип оптического устройства, принцип работы которого заключается в следующем: на ткань биологического объекта (БО) устройство воздействует источниками излучения, а отраженный световой поток фиксируется фотоприемниками. Оптические элементы входят в состав оптопары. Далее, производится усиление, фильтрация, оцифровка и передача сигнала (блок обработки и передачи данных, БОиПД) на ПК.

На рис. 2 и 3 представлены структурная схема и разработанное устройство регистрации соответственно.

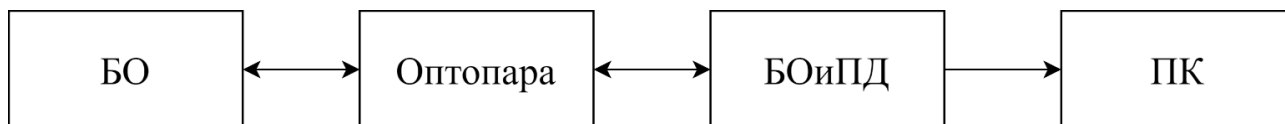


Рис. 2. Структурная схема оптического устройства для регистрации мышечной усталости на основе fNIRS

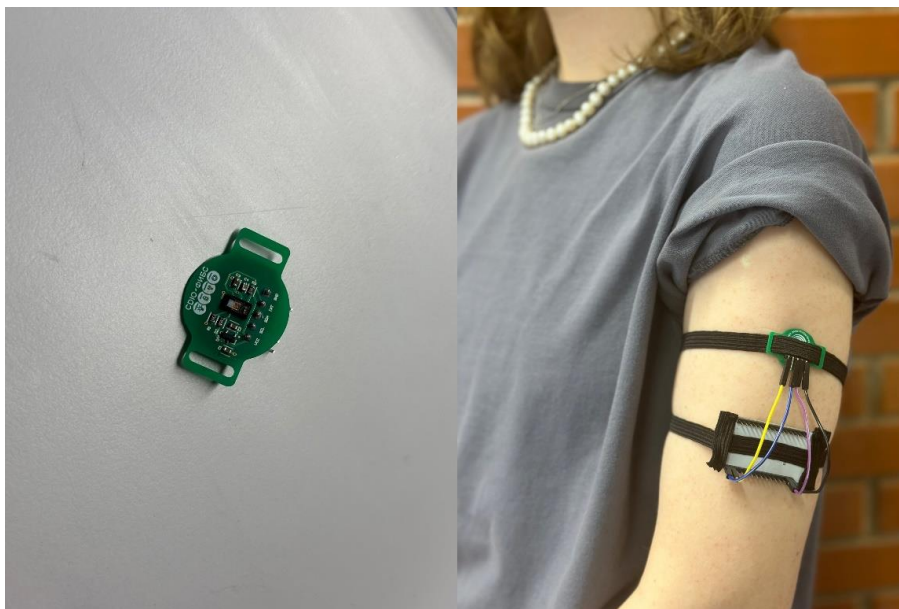


Рис. 3. Прототип устройства для оценки мышечной усталости

В основе устройства регистрации лежит интерфейсная микросхема. В ее состав входят два источника излучения (660 и 880 нм), фотоприемник, аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) и блок фильтрации. Описанное решение позволяет регулировать параметры входного сигнала (светового потока), в частности выбор светодиодов и интенсивности излучения, а также параметры регистрации выходного сигнала (световой поток, прошедший через ткань) – выбор частоты дискретизации и разрядности АЦП. Еще одним преимуществом является согласованность по оптическим характеристикам источников излучения и фотоприемника. Значения длин волн светодиодов обусловлены пиком спектра поглощения гемоглобина.

Для обеспечения достаточной глубины проникновения излучения и регистрации непосредственно оптического сигнала с мышц ток светодиода должен составлять не менее 10 мА. Также, в ходе экспериментальных исследований было выяснено,

при более низких значениях интенсивности света было недостаточно, в связи с чем, снижалось качество сигнала. Данные значения тока применимы для используемой оптопары в разработанном устройстве. В каждом отдельном случае необходимо проводить калибровку оптической части прибора.

IV. АПРОБАЦИЯ МАКЕТА

Исследования проводились по двум сценариям:

- Активные упражнения (неизометрические) – упражнения, при которых происходят мышечные сокращения. В качестве таковых выполнялись отжимания.
- Статические упражнения (изометрические) – упражнения, при которых мышцы находятся в напряжении, но при этом не сокращаются.

Первый сценарий:

Мужчина (20 лет) выполнял 20 отжиманий от пола. Перед началом и после завершения упражнений предусматривались минутные временные паузы для выравнивания дрейфа изолинии. Полученный сигнал был нормирован. Всего были проделаны 4 повтора сценария. Результаты представлены на рис. 4.

Второй сценарий:

Девушка (21 год) выполняла подъем на носки (изометрическое упражнение). Перед началом и после завершения упражнений предусматривались минутные временные паузы для выравнивания дрейфа изолинии. Полученный сигнал был нормирован. Всего были проделаны 3 повтора сценария. Результаты представлены на рис. 5.

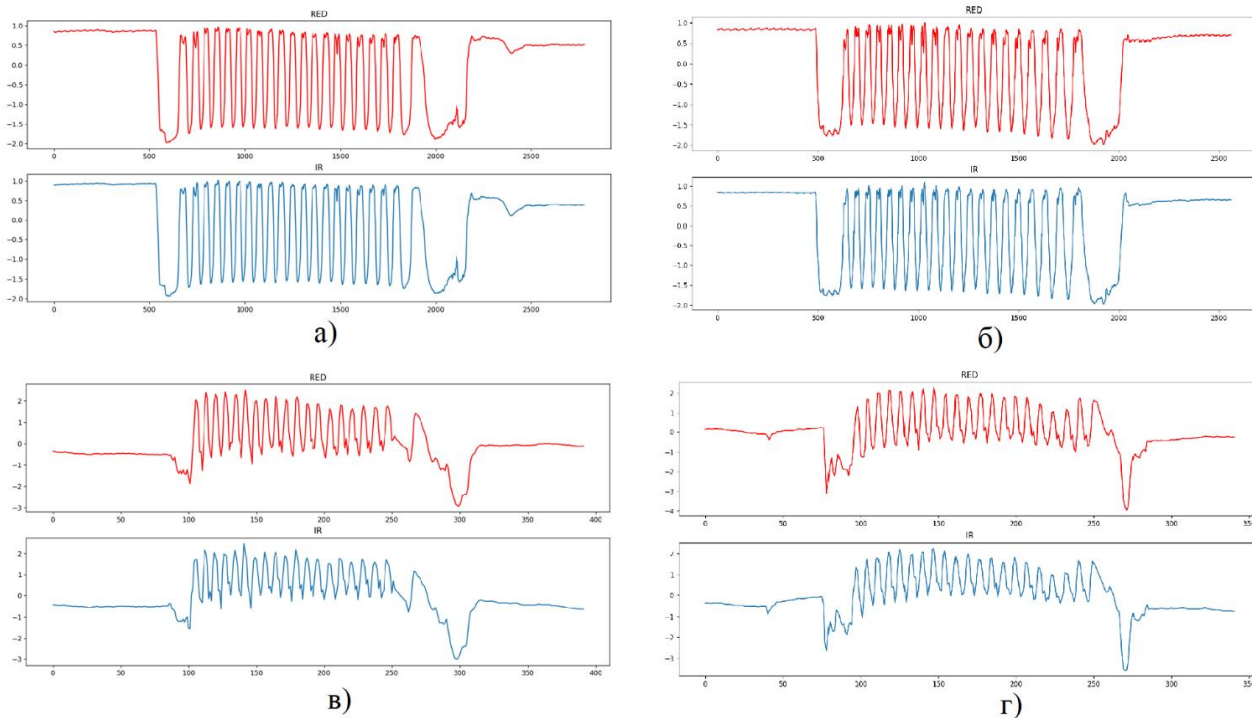


Рис. 4. Оптические сигналы с бицепса для четырех итераций (а, б, в и г, соответственно)

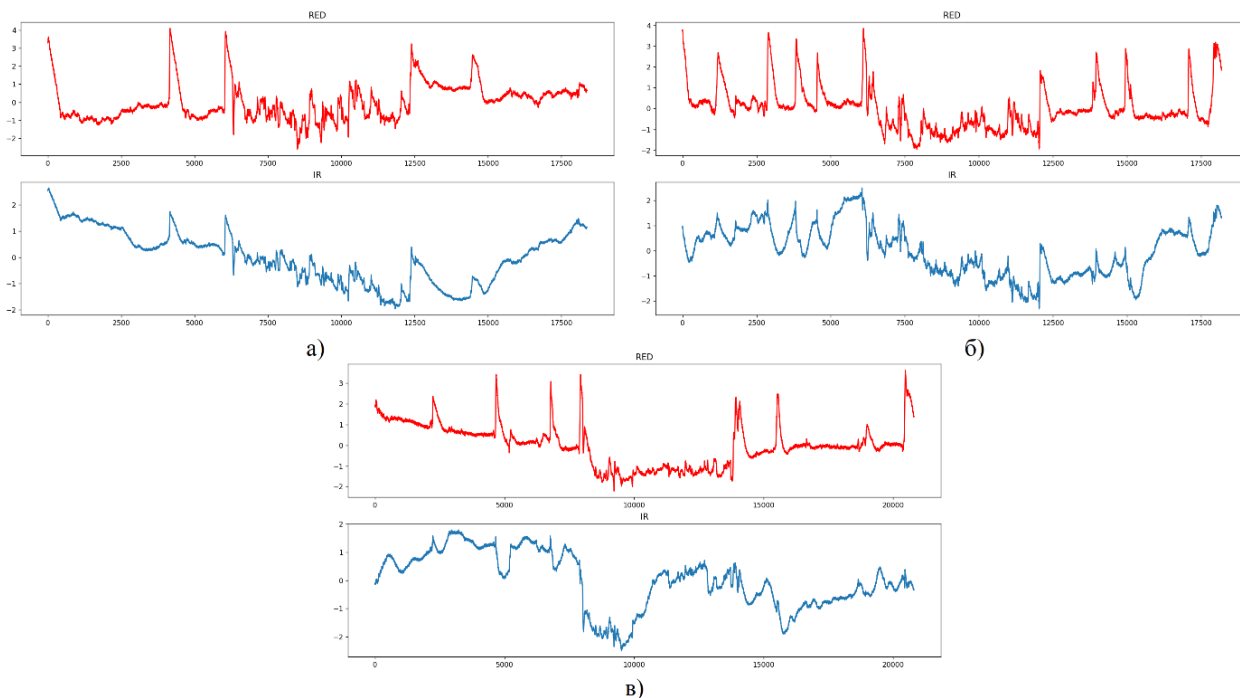


Рис. 5. Оптические сигналы с икроножной мышцей для трех итераций (а, б, в, соответственно)

V. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Первый сценарий: размах сигнала во время первой и второй итерации практически не изменился, на третьей и четвертой – заметно снижается. Участок сигнала после отжиманий характеризует процесс восстановления мышц после физической нагрузки. Исходя из сравнения нормированных значений fNIRS в начале и в конце записи, можно отметить следующие особенности:

- на рис. 4а, б – значения практически совпадают;
- на рис. 4в, г – значения кислорода в ткани в начале упражнений и в конце отличаются – описывает мышечную усталость.

Так же можно наблюдать отличные начальные значения во всех четырех итерациях, а именно – их снижение, что говорит о недостаточном времени восстановления мышц. Это, в свою очередь, приводит к снижению максимальной выдаваемой силы мышц.

Второй сценарий: причиной резких пиков является внутримышечное давление [5]. При статических упражнениях кровеносный сосуд сжимается сильнее, что приводит к временной окклюзии кровотока [6]. Как и в прошлом эксперименте имеет место снижение начального уровня сигналов при увеличении количества повторений упражнений.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение следует отметить, что в данной статье подробно описана разработка прототипа устройства, где используется функциональная спектроскопия в ближней инфракрасной области (фБИК) для мониторинга и оценки мышечного тонуса во время физических

упражнений. Важным физиологическим параметром является мышечная усталость, которая влияет на работоспособность, риск травм и общую эффективность тренировок. Представленное устройство, включающее оптопару с источниками красного и инфракрасного света, а также фотоприемник, позволило зарегистрировать гемодинамические изменения, свидетельствующие о мышечной усталости. Оценка мышечной усталости с помощью передовых технологий является инвестицией в здоровье спортсменов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Kovalenko A.P. et al. Scales and tests to assess the effectiveness of treatment and rehabilitation measures in patients with lower limb spasticity // *Journal of Neurology and Psychiatry*. SS Korsakov. 2018. Т. 118. №. 5. С. 120.
- [2] Goes R.A. et al. Musculoskeletal injuries in athletes from five modalities: a cross-sectional study // *BMC musculoskeletal disorders*. 2020. Т. 21. С. 1-9.
- [3] Orizio C. et al. The surface mechanomyogram as a tool to describe the influence of fatigue on biceps brachii motor unit activation strategy. Historical basis and novel evidence // *European journal of applied physiology*. 2003. Т. 90. С.326-336.
- [4] Kasyanova Yana S., Egorov Dmitrii A., Shevchenko Dmitrii S. Biointerfaces: Types, Application and Perspectives // *Proceedings of the 2023 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, 2023, С. 1478-1482.
- [5] Şaylı Ö., Akin A., Cotuk H. B. Correlation analysis between surface electromyography and continuous-wave near-infrared spectroscopy parameters during isometric exercise to volitional fatigue // *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*. 2014. Т. 22. №. 3. С. 780-793.
- [6] Scano A. et al. Sustained fatigue assessment during isometric exercises with time-domain near infrared spectroscopy and surface electromyography signals // *Biomedical Optics Express*. 2020. Т. 11. №. 12. С. 7357-7375.