



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2021. Т. 21, вып. 2. С. 178–187  
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2021, vol. 21, iss. 2, pp. 178–187

Научная статья  
УДК 535.2:535.8  
<https://doi.org/10.18500/1817-3020-2021-21-2-178-187>

## Особенности динамики оптических и физиологических свойств мышечной ткани *in vitro* в процессе ее компрессии



О. А. Зюрюкина, Ю. П. Синичкин ✉

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Зюрюкина Ольга Анатольевна, аспирант кафедры оптики, [oazyuryukina@yandex.ru](mailto:oazyuryukina@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0003-0780-555X>

Синичкин Юрий Петрович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры оптики и биофотоники, заведующий Лабораторией оптической медицинской диагностики Научно-образовательного института оптики и биофотоники, [yusin49@gmail.com](mailto:yusin49@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-7554-5038>

**Аннотация.** В работе представлены результаты мониторинга изменения физиологических свойств образцов *in vitro* мышечной ткани коровы при наложении компрессии. Изменение физиологических параметров образцов оценивалось по спектральным изменениям в их диффузном отражении. Отмечено, что временное изменение спектров диффузного отражения образцов мышечной ткани при наложении компрессии в спектральной области 500–650 нм определяется двумя причинами: при наложении компрессии в мышечной ткани остается пигмент миоглобин, при этом миоглобин переходит в де-оксигенированную форму.

**Ключевые слова:** мышечная ткань, компрессия, дегидратация, диффузное отражение, *in vitro*, оксигемоглобин, де-оксигемоглобин, оксимиоглобин, де-оксимиоглобин, мет-миоглобин

**Благодарности:** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-90177 (разработка компрессионного метода управления оптическими и физиологическими свойствами биотканей).

**Для цитирования:** Зюрюкина О. А., Синичкин Ю. П. Особенности динамики оптических и физиологических свойств мышечной ткани *in vitro* в процессе ее компрессии // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2021. Т. 21, вып. 2. С. 178–187. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2021-21-2-178-187>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

Article  
<https://doi.org/10.18500/1817-3020-2021-21-2-178-187>

### Features of the dynamics of the optical and physiological properties of muscle tissue *in vitro* during its compression

О. А. Zyuryukina, Yu. P. Sinichkin ✉

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Ol'ga A. Zyuryukina, [oazyuryukina@yandex.ru](mailto:oazyuryukina@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0003-0780-555X>

Yury P. Sinichkin, [yusin49@gmail.com](mailto:yusin49@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-7554-5038>

**Abstract. Background and Objectives:** The compression of human skin is one of the mechanisms of mechanical biotissue optical clearing. In this study we investigated the effects of compression of *in vitro* cow muscle tissue samples on diffuse reflectance spectra of tissue and changes of its physiological properties. The purpose of research was to identify the correlation between diffuse reflectance of muscle tissue and its compression. **Material and Methods:** Samples of muscle tissue used in the experiments with a size of 70–50 mm and a thickness of 25 mm were cut from one volume of the loin hart of a cow. After applying pressure to the sample for a time of about 20 minutes, reflectance spectra of the samples were recorded with a time step of 5 seconds. In the experiments, sensors of different sizes were varied with different values of the applied external compression. **Results:** The dynamics of myoglobin and hemoglobin content in muscle tissue *ex vivo* in the compression process was determined. In the case of muscle tissue *ex vivo*, the blood content in it decreases when compression is applied. A similar effect was observed for skin tissue *in vivo*, but there are also significant differences: if for skin tissue capillary blood, and hemoglobin, when a pressure of about  $10^5$  Pa is applied, is completely removed from biological tissue, then myoglobin from muscle tissue samples is not completely removed, the oxygenated form of myoglobin turns into deoxygenated and



deoxygenation of myoglobin occurs within a few minutes after the application of compression. **Conclusion:** In perspective compression of muscle tissue *ex vivo* can become the basis for a method for controlling the content of hemoglobin and myoglobin derivatives and, as a result, for controlling the color of biological tissue.

**Keywords:** muscle tissue, compression, dehydration, diffuse reflection, *in vitro*, oxyhemoglobin, deoxyhemoglobin, oxymyoglobin, deoxymyoglobin, met-myoglobin

**Acknowledgements:** The reported study was funded by RFBR according to the research project № 19-32-90177.

**For citation:** Zyuryukina O. A., Sinichkin Yu. P. Features of the dynamics of the optical and physiological properties of muscle tissue *in vitro* during its compression. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2021, vol. 21, iss. 2, pp. 178–187 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2021-21-2-178-187>

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

## Введение

Внешняя механическая компрессия биоткани изменяет ее морфо-функциональное состояние, ее структуру, кровенаполненность кровеносных сосудов, вызывает перемещение воды внутри биоткани [1–10], что отражается на оптических свойствах биоткани (рассеянии и поглощении) [2, 3, 7, 11–13] и, как следствие, на величине и спектральном составе диффузно отраженного биологической тканью излучения [7, 8, 11–21].

Прежде всего в результате компрессии из биоткани выдавливается вода, которая определяет поглощение биоткани в ближней инфракрасной (ИК) области спектра и рассеивающие свойства биоткани как в ближнем ИК, так и в видимом диапазоне спектра. Уменьшение рассеяния света в сжатой биоткани в результате ее дегидратации является основным механизмом компрессионного оптического просветления биоткани [1].

Вопросы влияния компрессии на оптические свойства мягких тканей и возможные механизмы изменения оптических свойств биотканей *ex vivo* в условиях компрессии рассматривались в работах [11, 12]. В общем отмечалось, что при компрессии уменьшается диффузное отражение биотканей, обусловленное их дегидратацией, а коэффициенты поглощения для сжатых образцов имеют большую величину. Изменения в физической структуре мягкой ткани (несжатые образцы более рыхлые по сравнению со структурами более плотных и компактных сжатых образцов [14]) являются одной из причин изменения оптических свойств ткани под действием компрессии, а количество воды, вытесненной из области локализованного давления, является основным фактором вариаций спектров отражения.

Авторами работы [4] на основе экспериментов с *ex vivo* кожей свиньи получено, что локализованная механическая компрессия образцов кожи приводит к уменьшению рассогласования показателей преломления компонентов биоткани и уменьшению в ней рассеяния света. По мнению

авторов, просветление биоткани обратно пропорционально ее состоянию гидратации. Эти результаты хорошо согласуются с отмеченной авторами [9, 10] корреляцией между водными потерями и просветляющей способностью химических агентов для образцов мышечной ткани свиньи.

Влияние внешней механической компрессии на содержание воды в кожной ткани человека *in vivo* рассматривается в работах [8, 21]. В работе [22] представлены результаты исследования влияния дегидратации образцов *ex vivo* мышечной ткани коровы в процессе их высушивания или наложения компрессии на спектры их диффузного отражения.

Подробные исследования влияния давления волоконно-оптического датчика на оптические свойства биоткани приведены в [6], при этом акцент сделан на изменениях в содержании воды в образцах *in vitro* кожи свиньи и *in vivo* кожи человека. Результаты показали, что изменения свободной и связанной воды в ткани связаны с давлением нелинейным образом, причем в случае кожи свиньи *in vitro* наложение компрессии ведет к вытеснению свободной воды из области компрессии, в то время как перемещение связанной воды затруднено. Временные изменения содержания свободной и связанной воды в коже свиньи *ex vivo* происходят в течение времени порядка 6 минут после наложения компрессии, после чего процесс стабилизируется, при этом время стабилизации зависело от величины прикладываемого давления.

Вторым важным результатом воздействия внешней компрессии на физиологические свойства биоткани является изменение содержания в ней крови и ее оксигенации. Изменения таких физиологических параметров ткани, как объем крови, оксигенация гемоглобина крови и метаболизм ткани, по мнению авторов работ [17, 20], дают большой вклад в спектральные изменения диффузного отражения в области 500–700 нм. При этом авторы [20] считают, что изменения в спектрах специфичны для кожи разной морфологии.



В работе [23] легочная ткань подвергалась повторяющимся циклам компрессии. При сдавливании ткани отмечено уменьшение рассеяния, а также содержания гемоглобина и насыщения ткани кислородом. Авторы отмечают эффект гиперемии в течение повторяющихся циклов.

Влияние давления волоконно-оптического датчика на спектральные измерения диффузно отраженного света от слизистой внутренней стороны нижней губы человека *in vivo* исследовалось авторами работы [24]. Отмечено уменьшение содержания гемоглобина и степени оксигенации гемоглобина при наложении давления.

Эффекты влияния давления волоконно-оптического датчика на физиологические характеристики мышечной ткани мышцы *in vivo* исследовались авторами работы [16]. Получено, что при увеличении давления содержание крови и степень оксигенации гемоглобина крови уменьшаются. Увеличение давления приводит к уменьшению диаметров кровеносных сосудов, что, в свою очередь, приводит к увеличению плотности рассеивателей в единице объема, которое может ассоциироваться с увеличением приведенного коэффициента рассеяния. Авторы отмечают, что преобладающий вклад в поглощение мышечной ткани дают гемоглобин и миоглобин, при этом спектр поглощения миоглобина схож со спектром гемоглобина, а его концентрация в мышечной ткани обычно ниже, чем гемоглобина, поэтому считают вклад миоглобина в поглощение пренебрежимо малым, но он может увеличиться при уменьшении диаметра сосудов.

В работе [25] отмечается, что пигментами, отвечающими за цвет мышечной ткани, являются миоглобин и гемоглобин, при этом миоглобин является доминирующим пигментом ткани, который обычно существует в образцах ткани как оксимиоглобин, де-оксимиоглобин и мет-миоглобин. В работе приведены результаты мониторинга процессов оксигенации и окисления миоглобина в мышечной ткани свиньи. Получено, что с течением времени хранения образца ткани вначале образуются два слоя: внешний представлен в виде оксигенированного миоглобина, а внутренний занят де-оксимиоглобином, причем в течение нескольких дней процесс оксигенации распространяется внутрь образца, формируя более толстый слой ткани с оксимиоглобином. В дополнение к процессу оксигенации в образце мышечной ткани происходит также процесс окисления, который переводит оксимиоглобин и де-оксимиоглобин в мет-миоглобин.

Помимо содержащегося в мышечной ткани миоглобина в кровеносной системе мышц содержится гемоглобин, который в отличие от миоглобина, не способного транспортировать кислород от легких к периферическим тканям, этой возможностью обладает.

Для понимания процессов, происходящих в мышечной ткани, важно исследование временных изменений физиологических свойств мышечной ткани при наложении внешней компрессии, результаты которого представлены в данной статье. Частично вопрос инерционности биофизических процессов в биотканях при наложении внешней компрессии изучен в работах [17, 18], тем не менее он остается актуальным.

### **Экспериментальная установка, материалы и методы**

Измерения спектров диффузного отражения образцов биоткани осуществлялись с помощью установки, состоящей из осветительного устройства HL-2000 (Ocean Optics, США), волоконно-оптических датчиков и двух волоконно-оптических спектрометров USB4000 (Ocean Optics, США) и NIRQuest512-2.2 (Ocean Optics, США), сопряженных с персональными компьютерами. Установка обеспечивала регистрацию спектров в диапазоне от 400 до 2000 нм.

Детектирование отраженного образцами мышечной ткани света проводилось с помощью волоконно-оптического датчика собственной конструкции, обеспечивающего область приложения давления равной 30 мм, и двух волоконно-оптических датчиков фирмы Ocean Optics (R400-7-VIS/NIR и R600-7-VIS-125F), закрепленных в специальных держателях, обеспечивающих области приложения давления на образец размером 3.2 и 6.3 мм (размер торцов датчиков) и 10, 13.8 и 15.8 мм (размер торцов держателей). Датчики крепились на полукольце радиусом 40 мм, на которое оказывалось внешнее давление в диапазоне от 0 до  $10^6$  Па. Подробно конструкции датчиков изложены в работе [21].

Используемые в экспериментах образцы мышечной ткани размером 70×50 мм и толщиной 25 мм вырезались из одного объема филейной части коровы. После приложения давления на образец в течение времени порядка 20 мин регистрировались спектры его отражения с временным шагом, равным 5 с. В экспериментах варьировались датчики разных размеров с разными величинами прикладываемой внешней компрессии.



### Результаты и их обсуждение

Прикладываемая к поверхности образца биоткани компрессия приводит к изменениям в спектре его диффузного отражения (рис. 1), обусловленным изменением поглощающих и рассеивающих свойств биоткани.

Изменения диффузного отражения света на отдельных длинах волн в течение времени наложения компрессии приведены на рис. 2. Полученные результаты можно разделить на две группы.

Уменьшение отражения в спектральной области свыше 600 нм обусловлено в основном

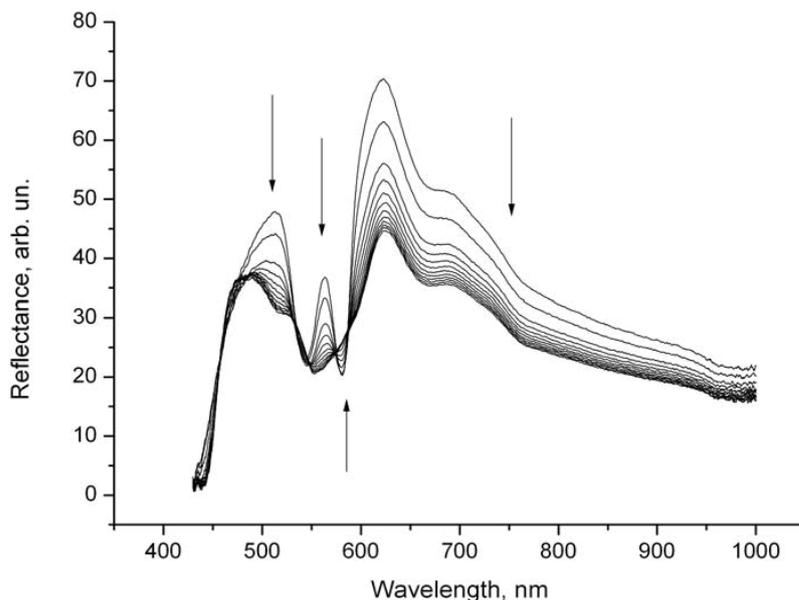


Рис. 1. Временные изменения в спектрах диффузного отражения образца мышечной ткани коровы при наложении компрессии. Датчик 15.8 мм. Стрелками показаны изменения в спектрах со временем

Fig. 1. Temporal changes in the diffuse reflectance spectrum of a bovine muscle tissue sample upon application of compression. Detector 15.8 mm. The arrows show changes in the spectrum over time

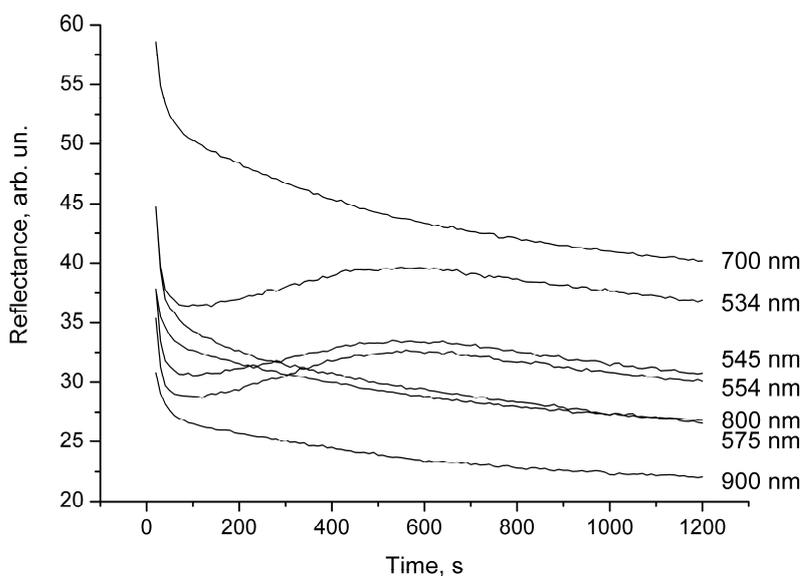


Рис. 2. Временные изменения в диффузном отражении образца мышечной ткани коровы при наложении компрессии на отдельных длинах волн. Датчик 10 мм

Fig.2. Temporal changes in the diffuse reflectance of a bovine muscle tissue sample upon application of compression at selected wavelengths. Detector 10.0 mm



уменьшением рассеяния биоткани при наложении компрессии, что наблюдалось и для кожи человека *in vivo* [21, 22].

В области длин волн, меньших 600 нм, поглощение превалирует над рассеянием, поэтому спектральные изменения в этой области обусловлены вариациями поглощения разновидностей гемоглобина и миоглобина.

В общем анализ динамики процессов поглощения, происходящих в мышечной ткани при наложении компрессии и отраженных в спектральных изменениях, достаточно сложный. Поглощение мышечной ткани в спектральной области 500–650 нм определяют гемоглобин и миоглобин, при этом спектры поглощения разных форм гемоглобина и миоглобина очень похожи.

Как отмечали авторы [25], процессы оксигенации и окисления делают срез мышечной ткани на три слоя. Самый верхний слой, где достаточно кислорода, аккумулирует оксимиоглобин, в то время как де-оксимиоглобин оккупирует самый внутренний слой, а слой мет-миоглобина формируется между ними (на расстоянии 1–6 мм от поверхности). В дальнейшем усиливается процесс окисления, а интенсивность процесса оксигенации уменьшается, в результате чего уменьша-

ется слой оксимиоглобина и расширяется слой мет-миоглобина в направлении к поверхности образца. Оксимиоглобин имеет максимальное поглощение при 543–544 и 581–582 нм, при этом спектр поглощения ОхуМб легко отличить наличием максимума на 582 нм, который больше пика на 544 нм с резкой впадиной между ними. При высоких концентрациях ОхуМб имеет красный цвет, в то время как при низких концентрациях ОхуМб проявляет желто-коричневый цвет. Для де-оксимиоглобина RdMb максимум поглощения отмечается при 555–557 нм, он имеет пурпурный красный цвет. Продукт окисления миоглобина (мет-миоглобин MetMb) имеет полосы поглощения на 505 и 634 нм и коричневый цвет [26–30].

Одними из важнейших компонентов скелетной мышечной ткани являются кровеносные сосуды, при этом на одно мышечное волокно приходится от трех до шести капилляров диаметром 7–8 мкм [31], а их количество зависит от физических нагрузок. Находящийся в кровеносной системе гемоглобин имеет максимумы поглощения в зависимости от его состояния: для оксигемоглобина максимумы поглощения на длинах волн 542–543 и 580 нм, а для де-оксигемоглобина – 555 нм (таблица).

**Максимумы поглощения производных гемоглобина и миоглобина из настоящих исследований и литературных данных**

**Table. Absorption maxima of hemoglobin and myoglobin derivatives from current studies and literature data**

Производные миоглобина и гемоглобина / Hemoglobin and myoglobin derivative	Настоящий эксперимент. Длина волны, нм / Real experiment. Wavelength, nm	Литературные данные [25–30]. Длина волны, нм / Literature data [25–30]. Wavelength, nm
RdMb	555–557	555
OxyMb	543–544 581–582	544 580
MetMb	500–505 630–634	– 634
NOMb	545–548 575–579	– –
OxyHb	541–542 576–577	544 580
DeoxyHb	555	555

Процессы формирования спектров диффузного отражения кожи и мышечной ткани хотя и отличаются друг от друга из-за разного морфологического состава биологических тканей, но имеют много общего. В коже обратное рассеяние (диффузное отражение) света форми-

руется благодаря диффузному рассеянию света коллагеновыми и эластичными волокнами в дермальном слое, при этом специфические черты спектра в сине-зеленой спектральной области обусловлены поглощением света в достаточно тонком слое поверхностного дермального со-



судистого сплетения, основными хромофорами которого являются оксигенированная и де-оксигенированная формы гемоглобина.

В мышечной ткани диффузное рассеяние света происходит на мышечных волокнах, где доминирующим пигментом является миоглобин, обычно существующий в формах оксимиоглобина, де-оксимиоглобина и мет-миоглобина, а также оксигенированная и де-оксигенированная формы гемоглобина, присутствующие в кровеносных сосудах мышечной ткани.

По аналогии с кожей, в кровеносной системе которой содержится только гемоглобин и изменение содержания гемоглобина и степень его оксигенации оцениваются путем введения индексов гемоглобина и степени оксигенации гемоглобина [7, 14], для мышечной ткани можно ввести индексы миоглобина и степени оксигенации миоглобина, а при наличии в ткани

гемоглобина и миоглобина можно ввести индекс глобина и степень оксигенации глобина.

Рис. 1 позволяет определить длины волн изобестических точек (534, 545 и 575 нм), т. е. длин волн, для которых величины оптической плотности мышечной ткани не зависят от степени оксигенации глобина мышечной ткани. Соответственно, индекс глобина мышечной ткани можно выразить следующим образом [7]:

$$H = \frac{OD_{550} - OD_{529}}{21} - \frac{OD_{571} - OD_{550}}{21},$$

где оптическая плотность  $OD(\lambda)$  связана со спектром диффузного отражения ткани  $R(\lambda)$  простым соотношением  $OD(\lambda) = -\log(R(\lambda))$ , а индексами под величинами оптической плотности отмечены длины волн изобестических точек.

На рис. 3 приведены временные зависимости индекса глобина в образцах мышечной ткани при наложении внешней компрессии.

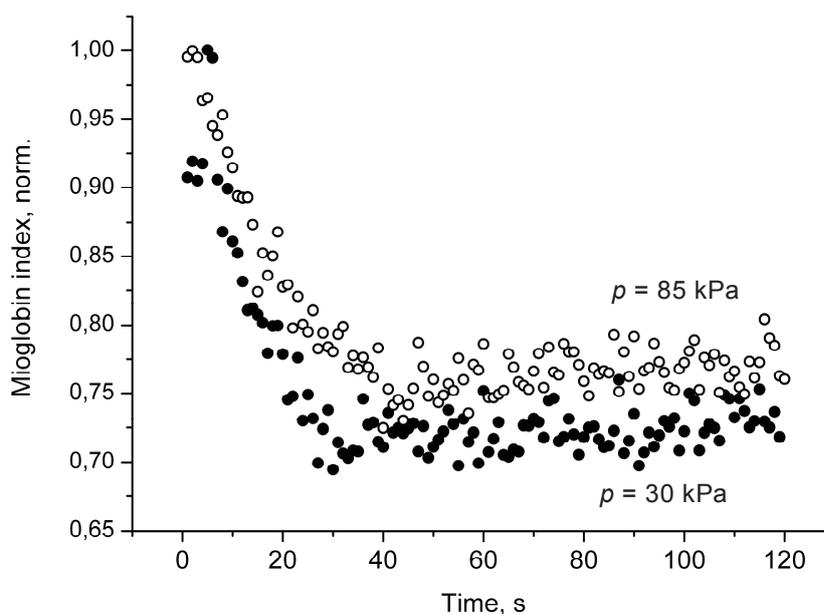


Рис. 3. Динамика индекса глобина в образце мышечной ткани *in vitro* в условиях внешней компрессии. Датчик 13.8 мм

Fig. 3. Dynamics of the globin index in a muscle tissue sample *in vitro* under external compression. Detector 13.8 mm

В случае мышечной ткани *in vitro* содержание в ней крови при наложении компрессии уменьшается. Подобный эффект наблюдался и для кожной ткани *in vivo*, однако имеются и существенные различия: если для кожной ткани капиллярная кровь, а вместе с ней гемоглобин при наложении давления порядка  $10^5$  Па полностью удаляются

из биоткани [7], то глобин из образцов мышечной ткани полностью не удаляется даже при наложении компрессии величиной до 150 кПа, при этом оставшаяся часть глобина является не чем иным, как миоглобином.

Оценить степень оксигенации глобина мышечной ткани можно по формуле, аналогичной



формуле для оценки степени оксигенации гемоглобина крови в коже [7]:

$$Y = \alpha \times \left[ \left( \frac{OD_{571} - OD_{554}}{17} - \frac{OD_{554} - OD_{550}}{4} \right) \times \frac{1}{H} + \beta \right],$$

где длина волны 554 нм соответствует максимуму поглощения де-оксигенированной формы миоглобина,  $\alpha = 31$ ,  $\beta = 1$ .

Динамика степени оксигенации образцов мышечной ткани в процессе компрессии приведена на рис. 4.

Таким образом, в случае мышечной ткани при наложении компрессии в мышечных волокнах остается миоглобин, при этом он переходит в де-оксигенированную форму (степень оксигенации миоглобина равна нулю).

До наложения компрессии спектр отражения показывал два максимума поглощения на длинах волн 544 и 580 нм, которые могут принадлежать как оксигемоглобину, так и оксимиоглобину. Наложение на мышечную ткань компрессии по-разному действует на содержание в ткани гемоглобина и миоглобина. Ситуация с гемоглобином подобна ситуации в коже при наложении компрессии: компрессия выдавливает

кровь из капилляров, при этом при давлении порядка  $10^5$  Па кровь выдавливается из подверженного компрессии объема кожной ткани практически полностью, что определяется обращением в нуль индекса гемоглобина [7]. При наложении компрессии должна выдавливаться кровь (и гемоглобин) и из капиллярной кровеносной системы мышц и в мышечной ткани остается миоглобин. Это подтверждает и спектр поглощения выдавленной из ткани жидкости: максимумы поглощения соответствуют максимумам поглощения оксигемоглобина (542–543 и 580 нм). Из рис. 3 видно, что по прошествии времени порядка 6–7 мин гемоглобин выходит из ткани вместе с кровью и на миоглобин (оставшаяся не выдавленной часть пигмента в ткани) приходится около 70%. Более того, форма спектра отражения с течением времени меняется: максимум поглощения оксимиоглобина смещается от длины волны 555 нм в коротковолновую область благодаря присутствию мет-миоглобина.

Из рис. 4 видно, что такие же времена порядка 6–7 минут соответствуют де-оксигенации миоглобина после наложения компрессии.

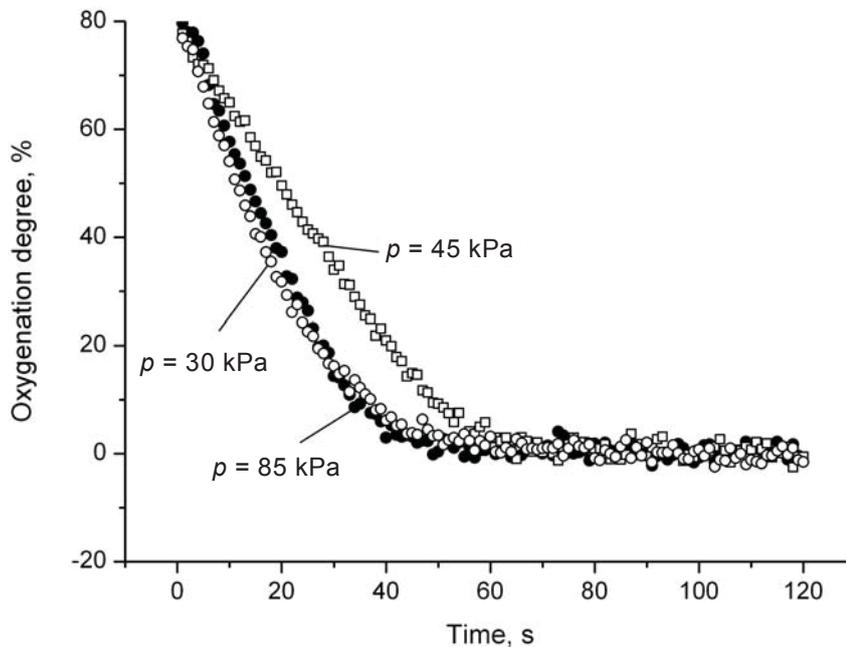


Рис. 4. Динамика степени оксигенации глобина в образце мышечной ткани *in vitro* в условиях внешней компрессии.  $p = 30$  кПа,  $p = 85$  кПа – датчик 13.8 мм;  $p = 45$  кПа – датчик 6.3 мм

Fig. 4. Dynamics of the degree of globin oxygenation in a muscle tissue sample *in vitro* under external compression.  $p = 30$  kPa,  $p = 85$  kPa – detector 13.8 mm;  $p = 45$  kPa – detector 6.3 mm



## Заключение

Результаты мониторинга методом диффузной отражательной спектроскопии динамики физиологических свойств образцов *in vitro* мышечной ткани коровы при наложении компрессии позволяют сделать вывод о возможности использования внешней механической компрессии для оценки содержания в ткани производных миоглобина и гемоглобина. Наложение компрессии ведет к доминирующему содержанию в мышечной ткани пигмента миоглобина в де-оксигенированной форме.

В перспективе компрессия мышечной ткани может стать основой метода для оценки содержания гемоглобина и миоглобина в ткани и, соответственно, цвета биоткани.

## Список литературы

- Rylander C. G., Stumpp O. F., Milner T. E., Kemp N. J., Mendenhall J. M., Diller K. R., Welch A. J. Dehydration mechanism of optical clearing in tissue // *Journal of Biomedical Optics*. 2006. Vol. 11, № 4. P. 041117. DOI: 10.1117/1.2343208
- Vogt W. C., Shen H., Wang G., Rylander C. G. Parametric study of tissue optical clearing by localized mechanical compression using combined finite element and Monte Carlo simulation // *Journal of Innovative Optical Health Sciences*. 2010. Vol. 3, № 3. P. 203–211. DOI: 10.1142/S1793545810000999X
- Izquierdo Roman A., Vogt W. C., Hyacinth L., Rylander C. G. Mechanical tissue optical clearing technique increases imaging resolution and contrast through *ex vivo* porcine skin // *Lasers in Surgery and Medicine*. 2011. Vol. 43. P. 814–823. DOI: 10.1002/lsm.21158
- Gurjarpadhye A., Vogt W. C., Liu Y., Rylander C. G. Effect of localized mechanical indentation on skin water content evaluated using OCT // *International Journal of Biomedical Imaging*. 2011. Vol. 2011. P. 817250. DOI: 10.1155/2011/817250
- Cugmas B., Bürmena M., Bregar V., Pernuša F., Likar B. Pressure-induced near infrared spectra response as a valuable source of information for soft tissue classification // *Journal of Biomedical Optics*. 2013. Vol. 18, № 4. P. 047002. DOI: 10.1117/1.JBO.18.4.047002
- Li C., Jiang J., Xu K. The variations of water in human tissue under certain compression : Studied with diffuse reflectance spectroscopy // *Journal of Innovative Optical Health Sciences*. 2013. Vol. 6, № 1. P. 1350005. DOI: 10.1142/S1793545813500053
- Нахаева И. А., Мохаммед М. Р., Зюрюкина О. А., Синичкин Ю. П. Влияние внешней механической компрессии на оптические свойства кожной ткани *in vivo* // *Оптика и спектроскопия*. 2014. Т. 117, № 3. С. 522–528. DOI: 10.7868/S0030403414090177
- Нахаева И. А., Зюрюкина О. А., Мохаммед М. Р., Синичкин Ю. П. Влияние внешней механической компрессии на содержание воды в кожной ткани человека *in vivo* // *Оптика и спектроскопия*. 2015. Т. 118, № 5. С. 152–159. DOI: 10.7868/S0030403415050128
- Xu X., Wang R. K. The role of water desorption on optical clearing of biotissue: Studied with near infrared reflectance spectroscopy // *Medical Physics*. 2003. Vol. 30, № 6. P. 1246–1253. DOI: 10.1118/1.1576228
- Xu X., Wang R. K. Synergistic effect of hyperosmotic agents of dimethyl sulfoxide and glycerol on optical clearing of gastric tissue studied with near infrared spectroscopy // *Physics in Medicine and Biology*. 2004. Vol. 49. P. 457–468. DOI: 10.1088/0031-9155/49/3/008
- Chan E. K., Sorg B., Protsenko D. O'Neil M., Motamedi M., Welch A. J. Effects of compression on soft tissue optical properties // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 1996. Vol. 2, № 4. P. 943–950. DOI: 10.1109/2944.577320
- Shangguan H., Prael S. A., Jacques S. L., Casperson L. W., Gregory K. W. Pressure effects on soft tissues monitored by changes in tissue optical properties // *Proceedings of SPIE*. 1998. Vol. 3254. P. 366–371.
- Vogt W. C., Izquierdo Roman A., Nichols B., Lim L., Tunnell J. W., Rylander C. G. Effects of mechanical indentation on diffuse reflectance spectra, light transmission, and intrinsic optical properties in *ex vivo* porcine skin // *Lasers in Surgery and Medicine*. 2012. Vol. 44. P. 303–309. DOI: 10.1002/lsm.22018
- Синичкин Ю. П., Утц С. Р., Пилипенко Е. А. Спектроскопия кожи человека *in vivo*: 1. Спектры отражения // *Оптика и спектроскопия*. 1996. Т. 80, № 2. С. 260–267.
- Chen W., Liu R., Xu K., Wang R. K. Influence of contact state on NIR diffuse reflectance spectroscopy *in vivo* // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2005. Vol. 38. P. 2691–2695. DOI: 10.1088/0022-3727/38/15/022
- Reif R., Amoroso M. S., Calabro K. W., A' Amar O., Singh K. S., Bigio I. J. Analysis of change in reflectance measurements on biological tissues subjected to different probe pressures // *Journal of Biomedical Optics*. 2008. Vol. 13, № 1. P. 010502. DOI: 10.1117/1.2870115
- Ti Y., Lin W. C. Effects of probe contact pressure on *in vivo* optical spectroscopy // *Optical Express*. 2008. Vol. 16, № 6. P. 4250–4262. DOI: 10.1142/S1793545813500053
- Rylander C. G., Milner T. E., Baranov S. A., Nelson J. S. Mechanical tissue optical clearing devices: Enhancement of light penetration in *ex vivo* porcine skin and adipose tissue // *Lasers in Surgery and Medicine*. 2008. Vol. 40, № 10. P. 688–694. DOI: 10.1002/lsm.20718
- Delgado Atencio J. A., Orozco Guillen E. E., Vazquez Montiel S., Cunill Rodríguez M., Castro Ramos J., Gutiérrez J. L., Martínez F. Influence of probe pressure on human skin diffuse reflectance spectroscopy measurements // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. 2009. Vol. 18, № 1. P. 6–14. DOI: 10.3103/S1060992X09010020
- Lim L. A., Nichols B., Rajaram N., Tunnell J. W. Probe pressure effects on human skin diffuse reflectance and fluorescence spectroscopy measurements // *Journal of Biomedical Optics*. 2011. Vol. 16, № 1. P. 011012. DOI: 10.1117/1.3525288



21. Зюрюкина О. А., Синичкин Ю. П. Динамика оптических и физиологических свойств кожи человека *in vivo* в процессе ее компрессии // Оптика и спектроскопия. 2019. Т. 127, № 3. С. 498–506. DOI: 10.1134/S0030400X19090297
22. Зюрюкина О.А., Синичкин Ю.П. Дегидратация биотканей в процессе их компрессии // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2020. Т. 20, вып. 2. С. 92–102. DOI: 10.18500/1817-3020-2020-20-2-92-102
23. Carp S. A., Kauffman T., Fang Q., Rafferty E., Moore R., Kopans D., Boas D. Compression-induced changes in the physiological state of the breast as observed through frequency domain photon migration measurements // Journal of Biomedical Optics. 2006. Vol. 11, № 6. P. 064016. DOI: 10.1117/1.2397572
24. Ruderman S., Gomes A. J., Stoyneva V., Rogers J. D., Fought A. J., Jovanovic B. D., Backman V. Analysis of pressure, angle and temporal effects on tissue optical properties from polarization-gated spectroscopic probe measurements // Biomedical Optics Express. 2010. Vol. 1, № 2. P. 489–499. DOI: 10.1364/BOE.1.000489
25. Thien Nguyen, Kien Nguyen Phan, Jee-Bum Lee, Jae Gwan Kim. Met-myoglobin formation, accumulation, degradation and myoglobin oxygenation monitoring based on multiwavelength attenuation measurement in porcine meat // Journal of Biomedical Optics. 2016. Vol. 21, № 5. P. 057002. DOI: 10.1117/1.JBO.21.5.057002
26. Millar S. J., Moss B. W., Stevenson M. H. Some observations on the absorption spectra of various myoglobin derivatives found in meat // Meat Science. 1996. Vol. 42, № 3. P. 277–288. DOI: 10.1016/0309-1740(94)00045-x
27. Livingston D. J., Brown W. D. The chemistry of myoglobin and its reactions [meat pigments, food quality indices] // Food Technology. 1981. Vol. 35, № 5. P. 238–252.
28. Bowen W. J. The absorption spectra and extinction coefficients of myoglobin // Journal of Biological Chemistry. 1949. Vol. 179, № 1. P. 235–245.
29. Krzywicki K. Assessment of relative content of myoglobin, oxymyoglobin and metmyoglobin at the surface of beef // Meat Science. 1979. Vol. 3, № 1. P. 1–10. DOI: 10.1016/0309-1740(79)90019-6
30. Nighswander-Rempel S. P., Kupriyanov V. V., Shaw R. A. Relative contributions of hemoglobin and myoglobin to near-infrared spectroscopic images of cardiac tissue // Applied Spectroscopy. 2005. Vol. 59, № 2. P. 190–193. DOI: 10.1366/0003702053085106
31. Kano Y., Sakuma K. Effect of aging on the relationship between capillary supply and muscle fiber size // Advances in Aging Research. 2013. Vol. 2, № 1. P. 37–42. DOI: 10.4236/aar.2013.21005
2. Vogt W. C., Shen H., Wang G., Rylander C. G. Parametric study of tissue optical clearing by localized mechanical compression using combined finite element and Monte Carlo simulation. *Journal of Innovative Optical Health Sciences*, 2010, vol. 3. no. 3. pp. 203–211. DOI: 10.1142/S1793545810000999X
3. Izquierdo Roman A., Vogt W. C., Hyacinth L., Rylander C. G. Mechanical tissue optical clearing technique increases imaging resolution and contrast through *ex vivo* porcine skin. *Lasers in Surgery and Medicine*, 2011, vol. 43, pp. 814–823. DOI: 10.1002/lsm.21158
4. Gurjarpadhye A., Vogt W. C., Liu Y., Rylander C. G. Effect of localized mechanical indentation on skin water content evaluated using OCT. *International Journal of Biomedical Imaging*, 2011, vol. 2011, pp. 817250. DOI: 10.1155/2011/817250
5. Cugmas B., Bürmena M., Bregar V., Pernuša F., Likar B. Pressure-induced near infrared spectra response as a valuable source of information for soft tissue classification. *Journal of Biomedical Optics*, 2013, vol. 18, no. 4, pp. 047002. DOI: 10.1117/1.JBO.18.4.047002
6. Li C., Jiang J., Xu K. The variations of water in human tissue under certain compression: Studied with diffuse reflectance spectroscopy. *Journal of Innovative Optical Health Sciences*, 2013, vol. 6, no. 1, pp. 1350005. DOI: 10.1142/S1793545813500053
7. Nakhaeva I. A., Mohammed R. M., Zyuryukina O. A., Sinichkin Yu. P. Effect of external mechanical pressure on optical properties of the human skin *in vivo*. *Optics and Spectroscopy*, 2014, vol. 117, no. 3, pp. 506–512. DOI: 10.1134/S0030400X14090173
8. Nakhaeva I. A., Zyuryukina O. A., Mohammed R. M., Sinichkin Yu. P. The effect of external mechanical compression on *in vivo* water content in human skin. *Optics and Spectroscopy*, 2015, vol. 118, no. 5, pp. 834–840. DOI: 10.1134/S0030400X15050124.
9. Xu X., Wang R. K. The role of water desorption on optical clearing of biotissue: Studied with near infrared reflectance spectroscopy. *Medical Physics*, 2003, vol. 30, no. 6, pp. 1246–1253. DOI: 10.1118/1.1576228
10. Xu X., Wang R. K. Synergistic effect of hyperosmotic agents of dimethyl sulfoxide and glycerol on optical clearing of gastric tissue studied with near infrared spectroscopy. *Physics in Medicine and Biology*, 2004, vol. 49, pp. 457–468. DOI: 10.1088/0031-9155/49/3/008
11. Chan E. K., Sorg B., Protsenko D., O’Neil M., Motamedi M., Welch A. J. Effects of compression on soft tissue optical properties. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1996, vol. 2, no. 4, pp. 943–950. DOI: 10.1109/2944.577320
12. Shangguan H., Prah S. A., Jacques S. L., Casperson L. W. Gregory K. W. Pressure effects on soft tissues monitored by changes in tissue optical properties. *Proceedings of SPIE*, 1998, vol. 3254, pp. 366–371.
13. Vogt W. C., Izquierdo Roman A., Nichols B., Lim L., Tunnell J. W., Rylander C. G. Effects of mechanical indentation on diffuse reflectance spectra, light transmission, and intrinsic optical properties in *ex vivo* porcine skin. *Lasers in Surgery and Medicine*, 2012, vol. 44, pp. 303–309. DOI: 10/1002/lsm.22018

## References

1. Rylander C. G., Stumpp O. F., Milner T. E., Kemp N. J., Mendenhall J. M., Diller K. R., Welch A. J. Dehydration mechanism of optical clearing in tissue. *Journal of Biomedical Optics*, 2006, vol. 11, no. 4, pp. 041117. DOI: 10.1117/1.2343208



14. Sinichkin Yu. P., Utz S. R., Pilipenko H. A. Spectroscopy of the human skin *in vivo*: 1. Reflectance spectra. *Optics and Spectroscopy*, 1996, vol. 80, no. 2, pp. 260–267.
15. Chen W., Liu R., Xu K., Wang R. K. Influence of contact state on NIR diffuse reflectance spectroscopy *in vivo*. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2005, vol. 38, pp. 2691–2695. DOI: 10.1088/0022-3727/38/15/022
16. Reif R., Amoroso M. S., Calabro K. W., A' Amar O., Singh K. S., Bigio I. J. Analysis of change in reflectance measurements on biological tissues subjected to different probe pressures. *Journal of Biomedical Optics*, 2008, vol. 13, no. 1, pp. 010502. DOI: 10.1117/1.2870115
17. Ti Y., Lin W. C. Effects of probe contact pressure on *in vivo* optical spectroscopy. *Optical Express*, 2008, vol. 16, no. 6, pp. 4250–4262. DOI: 10.1142/S1793545813500053
18. Rylander C. G., Milner T. E., Baranov S. A., Nelson J. S. Mechanical tissue optical clearing devices: Enhancement of light penetration in *ex vivo* porcine skin and adipose tissue. *Lasers in Surgery and Medicine*, 2008, vol. 40, no. 10, pp. 688–694. DOI: 10.1002/Ism.20718
19. Delgado Atencio J. A., Orozco Guillen E. E., Vazquez Montiel S., Cunill Rodríguez M., Castro Ramos J., Gutiérrez J. L., Martínez F. Influence of probe pressure on human skin diffuse reflectance spectroscopy measurements. *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*, 2009, vol. 18, no. 1, pp. 6–14. DOI: 10.3103/S1060992X09010020
20. Lim L. A., Nichols B., Rajaram N., Tunnell J. W. Probe pressure effects on human skin diffuse reflectance and fluorescence spectroscopy measurements. *Journal of Biomedical Optics*, 2011, vol. 16, no. 1, pp. 011012. DOI: 10.1117/1.3525288
21. Zyuryukina O. A., Sinichkin Yu. P. The dynamics of optical and physiological characteristics of human skin *in vivo* during its compression // *Optics and Spectroscopy*, 2019, vol. 127, no. 3, pp. 555–563. DOI: 10.1134/S0030400X19090297
22. Zyuryukina O. A., Sinichkin Yu. P. Dehydration of biotissues during their compression. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser.: Physics*, 2020, vol. 20, iss. 2, pp. 92–102 (in Russian). DOI: 10.18500/1817-3020-2020-20-2-92-102
23. Carp S. A., Kauffman T., Fang Q., Rafferty E., Moore R., Kopans D., Boas D. Compression-induced changes in the physiological state of the breast as observed through frequency domain photon migration measurements. *Journal of Biomedical Optics*, 2006, vol. 11, no. 6, pp. 064016. DOI: 10.1117/1.2397572
24. Ruderman S., Gomes A. J., Stoyneva V., Rogers J. D., Fought A. J., Jovanovic B. D., Backman V. Analysis of pressure, angle and temporal effects on tissue optical properties from polarization-gated spectroscopic probe measurements. *Biomedical Optics Express*, 2010, vol. 1, no. 2, pp. 489–499. DOI: 10.1364/BOE.1.000489
25. Thien Nguyen, Kien Nguyen Phan, Jee-Bum Lee, Jae Gwan Kim. Met-myoglobin formation, accumulation, degradation and myoglobin oxygenation monitoring based on multiwavelength attenuation measurement in porcine meat. *Journal of Biomedical Optics*, 2016, vol. 21, no. 5, pp. 057002. DOI: 10.1117/1.JBO.21.5.057002
26. Millar S. J., Moss B. W., Stevenson M. H. Some observations on the absorption spectra of various myoglobin derivatives found in meat. *Meat Science*, 1996, vol. 42, no. 3, pp. 277–288. DOI: 10.1016/0309-1740(94)00045-x
27. Livingston D. J., Brown W. D. The chemistry of myoglobin and its reactions [meat pigments, food quality indices]. *Food Technology*, 1981, vol. 35, no. 5, pp. 238–252.
28. Bowen W. J. The absorption spectra and extinction coefficients of myoglobin. *Journal of Biological Chemistry*, 1949, vol. 179, no. 1, pp. 235–245.
29. Krzywicki K. Assessment of relative content of myoglobin, oxymyoglobin and metmyoglobin at the surface of beef. *Meat Science*, 1979, vol. 3, no. 1, pp. 1–10. DOI: 10.1016/0309-1740(79)90019-6
30. Nighswander-Rempel S. P., Kupriyanov V. V., Shaw R. A. Relative contributions of hemoglobin and myoglobin to near-infrared spectroscopic images of cardiac tissue. *Applied Spectroscopy*, 2005, vol. 59, no. 2, pp. 190–193. DOI: 10.1366/0003702053085106
31. Kano Y., Sakuma K. Effect of aging on the relationship between capillary supply and muscle fiber size. *Advances in Aging Research*, 2013, vol. 2, no. 1, pp. 37–42. DOI: 10.4236/aar.2013.21005

Поступила в редакцию 24.02.2021, после рецензирования 23.03.2021, принята к публикации 25.03.2021

Received 24.02.2021, revised 23.03.2021, accepted 25.03.2021