



БИОФИЗИКА И МЕДИЦИНСКАЯ ФИЗИКА

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2022. Т. 22, вып. 4. С. 350–356
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2022, vol. 22, iss. 4, pp. 350–356
<https://fizika.sgu.ru> <https://doi.org/0.18500/1817-3020-2022-22-4-350-356>, EDN: MSQYVY

Научная статья
УДК [612.014.462.7+612.014.462.8]:611.018.54+616.12:009.72

Различия оптических свойств мышечной ткани крысы при комнатной и физиологической температурах

Е. А. Гамаюнова (Козлова)¹, А. А. Доронкина¹, Е. Н. Лазарева^{1,2}, Д. К. Тучина^{1,2,3},
В. И. Кочубей^{1,2}✉, И. Ю. Янина^{1,2}

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

²Томский национальный исследовательский государственный университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36

³Институт биохимии имени А. Н. Баха ФИЦ Биотехнологии РАН, Россия 119071, г. Москва, Ленинский проспект, д. 33, строение 2

Гамаюнова (Козлова) Екатерина Алексеевна, аспирант Института физики, kate.kozlova64@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7709-5920>

Доронкина Анна Алексеевна, аспирант Института физики, лаборант учебной лаборатории атомной физики, квантовой электроники и спектроскопии, annador95@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1660-5499>

Лазарева Екатерина Николаевна, аспирант, ¹ведущий инженер, старший преподаватель кафедры оптики и биофотоники, ²младший научный сотрудник лаборатории лазерного молекулярного имиджинга и машинного обучения, lazarevaen@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9041-9846>

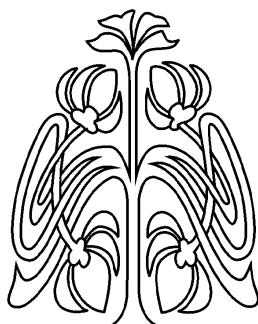
Тучина Дарья Кирилловна, кандидат физико-математических наук, ¹доцент кафедры оптики и биофотоники, ²старший научный сотрудник междисциплинарной лаборатории лазерного молекулярного имиджинга и машинного обучения, ³научный сотрудник лаборатории молекулярного имиджинга, tuchinadk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0203-4979>

Кочубей Вячеслав Иванович, доктор физико-математических наук, ¹профессор кафедры оптики и биофотоники, ²ведущий научный сотрудник междисциплинарной лаборатории лазерного молекулярного имиджинга и машинного обучения, saratov_gu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7834-9067>

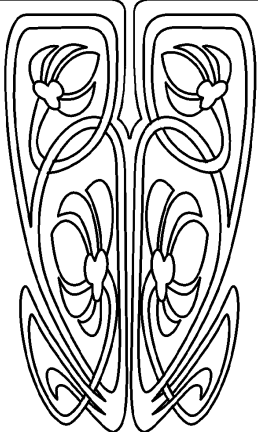
Янина Ирина Юрьевна, кандидат физико-математических наук, ¹доцент кафедры оптики и биофотоники, ²старший научный сотрудник междисциплинарной лаборатории лазерного молекулярного имиджинга и машинного обучения, irina-yanina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6814-556X>

Аннотация. Знание оптических и термических свойств тканей человека необходимо для оптимизации лазерной терапии и оптической диагностики. Большинство исследований проводятся при комнатной температуре образца. В то же время известно, что оптические свойства биотканей зависят от температуры даже в физиологическом диапазоне температур, т. е. в диапазоне нормального функционирования организма. Соответственно, возникает вероятность того, что использование литературных данных приведет к неправильной оценке условий распространения света через биологическую ткань в живом объекте. Некорректные данные об оптических свойствах биологических тканей при физиологической температуре могут привести к недостоверным результатам при медицинской оптической диагностике или терапии. Поэтому исследования температурных зависимостей оптических свойств биологических объектов, несомненно, являются актуальными.

В данной работе показаны различия оптических свойств мышечной ткани крыс до и после нагрева образцов до физиологической температуры. Была проведена регистрация



НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ





спектров коллимированного пропускания, полного пропускания и диффузного отражения мышечной ткани крысы. Регистрация спектров проводилась при 25°C (комнатная температура) и 38–39°C (физиологическая температура). Для каждой измеренной точки образца были рассчитаны спектральные зависимости коэффициентов поглощения, транспортного коэффициента рассеяния и фактора анизотропии исследованных образцов. Показано, что оптические свойства мышечной ткани различаются для комнатной и физиологической температур. При этом коэффициент поглощения практически не изменяется. В случае коэффициента рассеяния наблюдается слабое изменение наклона спектральной зависимости. Основным параметром, изменяющимся при варьировании температуры, является фактор анизотропии, что приводит к изменению также транспортного коэффициента рассеяния.

Ключевые слова: мышечная ткань, физиологическая температура, спектральные свойства

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 21-72-10057, <https://rscf.ru/project/21-72-10057/>.

Для цитирования: Гамаюнова (Козлова) Е. А., Доронкина А. А., Лазарева Е. Н., Тучина Д. К., Кочубей В. И., Янина И. Ю. Различия оптических свойств мышечной ткани крысы при комнатной и физиологической температурах // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2022. Т. 22, вып. 4. С. 350–356. <https://doi.org/0.18500/1817-3020-2022-22-4-350-356>, EDN: MSQVYV

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

Article

Differences in optical properties of rat muscle tissue at room and physiological temperatures

E. A. Gamayunova (Kozlova)¹, A. A. Doronkina¹, E. N. Lazareva^{1,2}, D. K. Tuchina^{1,2,3}, V. I. Kochubey^{1,2}✉, I. Yu. Yanina^{1,2}

¹Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

²National Research Tomsk State University, 36 Lenina St., Tomsk 634050, Russia

³A. N. Bach Institute of Biochemistry, Research Center of Biotechnology of the Russian Academy of Sciences, 33 build. 2, Leninsky prospect, Moscow 119071, Russia

Ekaterina A. Gamayunova (Kozlova), kate.kozlova64@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7709-5920>

Anna A. Doronkina, annador95@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1660-5499>

Ekaterina N. Lazareva, lazarevaen@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9041-9846>

Daria K. Tuchina, tuchinadk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0203-4979>

Vyacheslav I. Kochubey, saratov_gu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7834-9067>

Irina Yu. Yanina, irina-yanina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6814-556X>

Abstract. Background and Objectives : Knowledge of the optical and thermal human tissues properties is essential for optimizing laser therapy and optical diagnostics. Most studies are carried out at room temperature of the sample. At the same time, it is known that the optical properties of biological tissues depend on temperature even in the physiological temperature range, that is, in the range of normal functioning of the body. Accordingly, there is a possibility that the use of literature data will lead to an incorrect assessment of the conditions for the propagation of light through biological tissue in a living object. Incorrect data on the optical properties of biological tissues at physiological temperature can lead to unreliable results in medical optical diagnostics or therapy. Therefore, studies of the temperature dependences of the optical properties of biological objects are undoubtedly topical. This work shows the differences in the optical properties of rat muscle tissue before and after heating the samples to physiological temperature. **Materials and Methods:** The spectra of collimated transmission, total transmission and diffuse reflection of rat muscle tissue were recorded. The spectra were recorded at 25°C (room temperature) and 38–39°C (physiological temperature). For each measured point of the sample, the spectral dependences of the absorption coefficients, transport scattering coefficient, and anisotropy factor of the studied samples were calculated. **Results and conclusion:** It has been shown that the optical properties of muscle tissue differ for room and physiological temperatures. In this case, the absorption and scattering coefficients practically do not change. The main parameter that changes with temperature is the anisotropy factor. This change also leads to a change in the transport scattering coefficient.

Keywords: muscle tissue, physiological temperature, spectral properties

Acknowledgements: The study was supported by a grant Russian Science Foundation No. 21-72-10057, <https://rscf.ru/project/21-72-10057/>.

Information about the contribution of the authors. The authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

For citation: Gamayunova (Kozlova) E. A., Doronkina A. A., Lazareva E. N., Tuchina D. K., Kochubey V. I., Yanina I. Yu. Differences in optical properties of rat muscle tissue at room and physiological temperatures. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2022, vol. 22, iss. 4, pp. 350–356 (in Russian). <https://doi.org/0.18500/1817-3020-2022-22-4-350-356>, EDN: MSQVYV

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

Введение

Знание оптических и термических свойств тканей человека необходимо для оптимизации лазерной терапии и оптической диагностики. В настоящее время опубликовано значительное количество данных о спектральных свойствах

различных биологических тканей как в видимом, так и в ближнем инфракрасном диапазонах. Однако большинство исследований проводятся при комнатной температуре образца. В то же время известно, что оптические свойства биотканей зависят от температуры даже в физиологиче-



ском диапазоне температур, т. е. в диапазоне нормального функционирования организма [1–3]. Соответственно, возникает вероятность того, что использование литературных данных приведет к неправильной оценке условий распространения света через биологическую ткань в живом объекте.

Большинство исследований оптических свойств биологических тканей при физиологической температуре выполнены несколько десятилетий назад, и в настоящее время в основном исследуются изменения, происходящие при повышенных температурах, вплоть до температуры коагуляции ткани [4–6]. При этом происходят изменения, выражающиеся в увеличении коэффициента рассеяния света при слабом изменении коэффициента поглощения. При этом изменения зависят не только от типа биологической ткани, но и от вида животного [5]. Изменения коэффициента рассеяния объясняются трансформацией микроструктуры ткани вследствие термостимулированной коагуляции. Значительные изменения величины коэффициента поглощения возможны только при карбонизации ткани [5, 7]. На динамику изменения оптических свойств биологических тканей влияет также содержание в них жира, так как вызванные температурой фазовые переходы липидов могут значительно повлиять на рассеяние света в ткани.

В диапазоне от комнатной до физиологической температуры изменения оптических свойств биотканей наиболее хорошо исследованы в ближней инфракрасной области. В этой области поглощение обусловлено в основном водой. Модификации спектров поглощения воды, вызванные изменением температуры, в ближней инфракрасной области хорошо охарактеризованы [8–10]. При повышении температуры пик воды в районе 970 нм смещается в коротковолновую область, сужается и увеличивается в интенсивности [8, 11–14]. Характеристики этого пика являются чувствительными индикаторами локального окружения молекул воды. При повышении температуры доля водородно-связанных молекул воды уменьшается, что приводит к увеличению интенсивности, сужению полосы пропускания и смещению пика воды на 970 нм в сторону более высокой энергии (т. е. синему сдвигу). С другой стороны, водородная связь между водой и макромолекулами, такими как белки, вызывает [15, 16]. Эти два конкурирующих эффекта (т. е. красный и синий сдвиги

пика) усложняют правильную интерпретацию локального окружения молекул воды. Однако в спектре поглощения воды при 996 нм также существует изобестическая точка, в которой коэффициент поглощения не зависит от температуры [5, 17, 18].

Другим явлением, возникающим при изменении температуры воды, является изменение ее показателя преломления. Для D-линии температурная зависимость показателя преломления воды описывается формулой [19]

$$n = 0.00010341 \cdot T + 1.3357.$$

Изменение температуры воды от 25 до 38°C приводит к изменению показателя преломления от 1.3665 до 1.3678, т. е. на 0.0013. Оценка изменения коэффициента рассеяния света в мышечной ткани по формуле, приведенной в [20], показывает изменение коэффициента рассеяния на 3.5%. Исследования температурных изменений показателя преломления мышечной ткани приведены в работе [21]. Показано, что для мышечной ткани свиньи температурный коэффициент показателя преломления меняется по спектру, в зависимости от длины волны, от $-8 \cdot 10^{-4}$ до $-9.5 \cdot 10^{-4} \text{°C}^{-1}$. Для мышечной ткани человека эти значения составляют от $-3.8 \cdot 10^{-4}$ до $-3.45 \times 10^{-4} \text{°C}^{-1}$ [21].

О просветлении биологической ткани при изменении ее температуры от 20 до 40°C сообщалось в работе [22]. Авторы объясняют эти изменения фазовыми переходами липидов в биологических образцах.

Как отмечалось выше, некорректные данные об оптических свойствах биологических тканей при физиологической температуре могут привести к недостоверным результатам при медицинской оптической диагностике или терапии. Поэтому исследования температурных зависимостей оптических свойств биологических объектов, несомненно, являются актуальными.

В данной работе показаны различия оптических свойств мышечной ткани крыс до и после нагрева образцов до физиологической температуры.

Методы и материалы

Представленное исследование было выполнено на белых половозрелых крысах линии Wistar. При проведении экспериментов на животных соблюдались принятые международные этические нормы [23]. Исследовались образцы мышечной ткани бедра, взятые от 8 крыс, размером



10x10x1 мм. От каждой крысы брали по одному образцу. Это объяснялось тем, что, как известно, спектральные свойства биологической ткани *post mortem* несколько изменяются с течением времени. Нами исследовались образцы, взятые не позднее, чем через 1 час после смерти. На регистрацию всех данных для одного образца в одной его точке и при одной температуре тратилось время порядка часа. Дополнительно еще 30 минут тратилось на нагрев образца до нужной температуры – быстрый нагрев невозможен, потому что он приводит к коагуляции поверхностного слоя образца. Поэтому нами регистрировались спектры одного образца в нескольких (трех) точках.

Регистрация спектров полного пропускания и диффузного отражения мышечной ткани крысы проводилась в спектральном диапазоне 380–2000 нм на спектрофотометре Perkin Elmer Lambda 950 (США) с интегрирующей сферой. Температура поддерживалась постоянной при помощи специально разработанного столика с подогревателем. Регистрация коллимированного пропускания осуществлялась при помощи установки на основе спектрометров QE6500, Ocean Optics (США) в диапазоне 350–1000 нм. Измерительная часть установки (два коллиматора, две диафрагмы диаметром 2 мм и столик для образца) помещалась в термостабилизирующий шкаф [24]. Образцы биотканей помещались между двух предметных стекол в прямоугольную пластину с центральным отверстием размером 10 x10 мм. Толщина пластины 1 мм, что позволяло фиксировать толщину между стеклами. Регистрация спектров проводилась при 25°C

(комнатная температура) и 38–39°C (физиологическая температура). Известно, что нормальная температура тела крысы составляет 38.3–39.3°C. Нами устанавливалась температура 39°C, но во время эксперимента она могла меняться в диапазоне 38–39°C из-за некоторой нестабильности нагрева.

С использованием полученных спектров и программы IAD [25] для каждой измеренной точки образца были рассчитаны спектральные зависимости коэффициентов поглощения, транспортного коэффициента рассеяния и фактора анизотропии исследованных образцов. Затем полученные данные статистически обрабатывались при помощи программы Microcal Origin. Полученные средние значения и статистические отклонения представлены на графиках.

Результаты и их обсуждение

Полученные в результате расчетов спектры представлены на рис. 1–2.

Очевидно, что основными источниками пиков в спектрах являются полосы поглощения окисленной и восстановленной форм гемоглобина и воды. Из положения полосы Сорэ и формы α и β полос поглощения можно сделать вывод о преобладании окисленных форм гемоглобина. Полоса поглощения воды находится в области 970 нм. Изменения коэффициентов поглощения при повышении температуры находятся в пределах погрешности измерения и расчета, поэтому можно сделать вывод об отсутствии влияния температуры на поглощение.

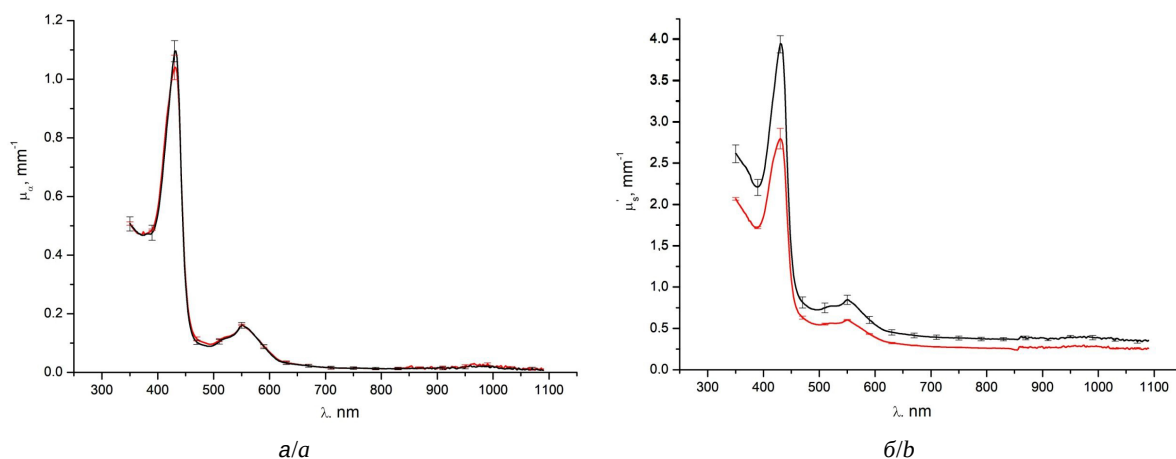


Рис. 1. Спектральные зависимости мышечной ткани крысы при 25°C (черная линия) и 39°C (красная линия): а – коэффициенты поглощения; б – транспортных коэффициентов рассеяния (цвет online)

Fig. 1. Spectral dependences of rat muscle tissue at 25°C (black line) and 39°C (red line) of: a – absorption coefficients; b – transport scattering coefficients (color online)

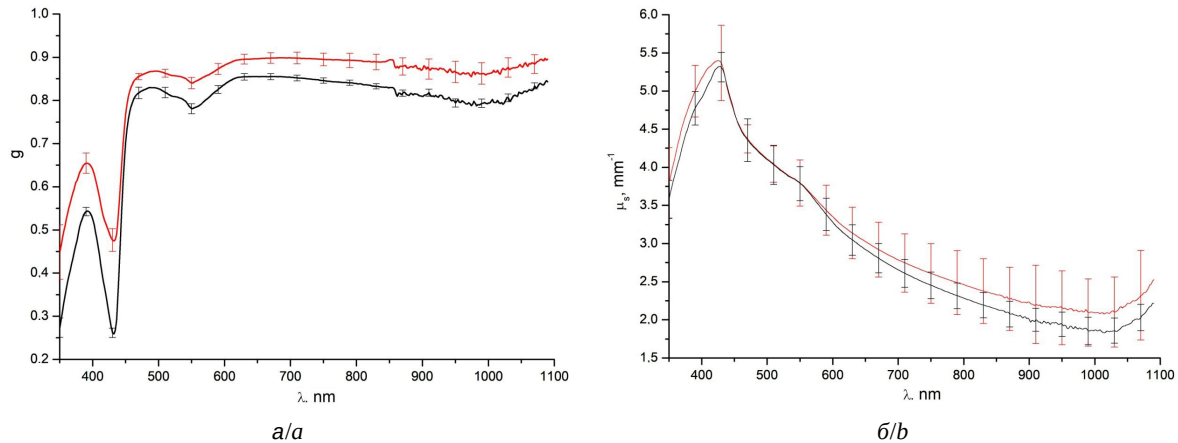


Рис. 2. Спектральные зависимости мышечной ткани крысы при 25°C (черная линия) и 39°C (красная линия): а – фактора анизотропии; б – коэффициентов рассеяния (цвет online)

Fig. 3. Spectral dependences of rat muscle tissue at 25°C (black line) and 39°C (red line) of: а – the anisotropy factor; б – scattering coefficients (color online)

Транспортный коэффициент рассеяния (рис. 2) при переходе от комнатной к физиологической температуре достаточно сильно уменьшается. Это сопровождается одновременным увеличением фактора анизотропии (рис. 2, а). Такие изменения могут быть вызваны как изменением показателей преломления мышечных волокон и межклеточной жидкости, так и изменением вклада различных процессов рассеяния в общую картину.

Для выявления причин изменений рассчитаны спектральные зависимости коэффициентов рассеяния мышечной ткани (рис. 2, б).

Коэффициент рассеяния света рассчитывался по стандартной формуле [26]:

$$\mu_s = \mu'_s / (1 - g). \quad (6)$$

Как показано на рис. 2, б, коэффициент рассеяния изменяется значительно слабее, причем можно заметить рост коэффициента рассеяния в ближней инфракрасной области при повышении температуры. Ввиду малой вероятности изменения формы размеров рассеивателей изменение коэффициента рассеяния может быть вызвано только изменением относительного показателя преломления. При увеличении длины волны увеличивается вклад рассеяния Ми на мышечных волокнах и уменьшается вклад рэлеевского рассеяния от надмолекулярных комплексов и клеточных органелл (ядра, митохондрии). Вследствие этого наиболее вероятно, что увеличение коэффициента рассеяния в ближней инфракрасной области при нагреве обусловлено именно рассогласованием показателей преломления малых частиц и их окружения.

Однако это не объясняет поведение транспортного коэффициента рассеяния. Основной вклад в изменение транспортного коэффициента рассеяния дает изменение фактора анизотропии, а именно его увеличение при увеличении температуры. Такое увеличение анизотропии может быть обусловлено вкладом рассеяния Ми на анизотропных рассеивателях (фибриллах). В настоящее время не существует однозначного объяснения данного эффекта. Одним из предположений может быть изменение степени анизотропии вследствие температурных изменений относительного показателя преломления. Изменение показателя преломления воды более выражено, чем у белковых структур. Также возможны температурные изменения структуры и плотности фибрилл.

Выводы

Показано, что оптические свойства мышечной ткани различаются для комнатной и физиологической температур. При этом коэффициенты поглощения и рассеяния практически не изменяются. Основным параметром, изменяющимся при изменении температуры, является фактор анизотропии. Это изменение приводит также к изменению транспортного коэффициента рассеяния.

Список литературы

1. Troy T. L., Thennadil S. N. Optical properties of human skin in the near infrared wavelength range of 1000 to 2200 nm // Journal of Biomedical Optics 2001. Vol. 6, iss. 2. P. 167–176. <https://doi.org/10.1117/1.1344191>



2. Laufer J., Simpson R., Kohl M., Cope M. Effect of temperature on the optical properties of *ex vivo* human dermis and subdermis // *Phys. Med. Biol.* 1998. Vol. 43. P. 2479–2489. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/43/9/004>
3. Troy T. L., Page D. L., Sevick-Muraca E. M. Optical properties of normal and diseased breast tissues: Prognosis for optical mammography // *J. Biomed. Opt.* 1996. Vol. 1. P. 342–355. <https://doi.org/10.1117/12.239905>
4. Jaywant S., Wilson B., Patterson M., Lilge L., Flotte T. Temperature-dependent changes in the optical absorption and scattering spectra of tissues: Correlation with ultrastructure // *Proc. SPIE. Laser-Tissue Interaction IV.* 1993. Vol. 1882. <https://doi.org/10.1117/12.148080>
5. Nagarajan V. K., Yu B. Monitoring of Tissue Optical Properties During Thermal Coagulation of *Ex Vivo* Tissues // *Lasers in Surgery and Medicine.* 2016. Vol. 48. P. 686–694. <https://doi.org/10.1002/lsm.22541>
6. Ao H. L., Xing D., Wei H. J., Gu H. M., Wu G. Y., Lu J. J. Thermal coagulation-induced changes of the optical properties of normal and adenomatous human colon tissues *in vitro* in the spectral range 400–1100nm // *Phys. Med. Biol.* 2008. Vol. 53. P. 2197–2206. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/53/8/013>
7. Thomsen S., Jacques S., Flock S. Microscopic correlates of macroscopic optical property changes during thermal coagulation of myocardium // *Proc Laser-Tissue Interaction.* 1990. Vol. 1202, iss. 2. P. 11. <https://doi.org/10.1117/12.17605>
8. Chung S. H., Cerussi A. E., Merritt S. I., Ruth J., Tromberg B. J. Non-invasive tissue temperature measurements based on quantitative DOS of water // *Phys. Med. Biol.* 2010. Vol. 55. P. 3753–3765. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/55/13/012>
9. Collins J. R. Change in the infra-red absorption spectrum of water with temperature // *Phys. Rev.* 1925. Vol. 26. P. 0771–0779. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.26.771>
10. Otal E. H., Inon F. A., Andrade F. J. Monitoring the temperature of dilute aqueous solutions using near-infrared water absorption // *Appl. Spectrosc.* 2003. Vol. 57. P. 661–6666. <https://doi.org/10.1366/000370203322005355>
11. Kelly J. J., Kelly K. A., Barlow C. H. Tissue temperature by near-infrared spectroscopy // *Proc. SPIE.* 1995. Vol. 2389. P. 818–28. <https://doi.org/10.1117/12.210025>
12. Libnau F. O., Kvalheim O. M., Christy A. A., Toft J. Spectra of water in the nearinfrared and midinfrared region // *Vib. Spectrosc.* 1994. Vol. 7. P. 243–254. [https://doi.org/10.1016/0924-2031\(94\)85014-3](https://doi.org/10.1016/0924-2031(94)85014-3)
13. Nachabé R., Hendriks B. H. W., Desjardins A. E., van der Voort Marjolein, Martin B. van der Mark. Estimation of lipid and water concentrations in scattering media with diffuse optical spectroscopy from 900 to 1600 nm // *Journal of Biomedical Optics.* 2010. Vol. 15, № 3. Article number 037015. <https://doi.org/10.1117/1.3454392>
14. Merritt S. I. Combination of broadband diffuse optical spectroscopy with magnetic resonance imaging. PhD Thesis. University of California, Irvine, 2005. 160 p.
15. Pimentel G. C., McClellan A. L. *The Hydrogen Bond.* San Francisco, W. Y. Freeman, 1960. 50 p.
16. Chung S. H., Cerussi A. E., Klifa C., Baek H. M., Birgul O., Gulsen G., Merritt S. I., Hsiang D., Tromberg B. J. *In vivo* water state measurements in breast cancer using broadband diffuse optical spectroscopy // *Phys. Med. Biol.* 2008. Vol. 53. P. 6713–6727. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/53/23/005>
17. Buijs K., Choppin G. R. Near-infrared studies of structure of water. 1. Pure water // *J. Chem. Phys.* 1963. Vol. 39. P. 2035–2041. <https://doi.org/10.1063/1.1734579>
18. Hollis V. S. Non-invasive monitoring of brain tissue temperature by near-infrared spectroscopy. PhD Thesis. University College. London, 2002. 263 p.
19. Белов Н. П., Лапиов С. Н., Патяев А. Ю., Шерстобитова А. С., Яськов А. Д. Температурная зависимость показателя преломления водных растворов этиленгликоля и пропиленгликоля // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики.* 2012. № 2 (78). С. 138–139.
20. Генина Э. А., Башкатов А. Н., Козинцева М. Д., Тучин В. В. ОКТ-исследование оптического просветления мышечной ткани *in vitro* с помощью 40%-ного раствора глюкозы // *Оптика и спектроскопия.* 2016. Т. 120, № 1. С. 27–35. <https://doi.org/10.7868/S0030403416010098>
21. Bashkatov A. N., Berezin K. V., Dvoretzkiy K. N., Chernavina M. L., Genina E. A., Genin V. D., Kochubey V. I., Lazareva E. N., Pravdin A. B., Shvachkina M. E., Timoshina P. A., Tuchina D. K., Yakovlev D. D., Yakovlev D. A., Yanina I. Yu., Zhernovaya O. S., Tuchin V. V. Measurement of tissue optical properties in the context of tissue optical clearing // *J. Biomed. Opt.* 2018. Vol. 23, № 9. Article number 091416. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.23.9.091416>
22. Ghita A., Matousenk P., Stone N. Sensitivity of Transmission Raman Spectroscopy Signals to Temperature of Biological Tissues // *Scientific Reports.* 2018. № 8. P. 8379. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25465-x>
23. International Guiding Principles for Biomedical Research Involving Animals. CIOMS and ICLAS. URL: <http://www.cioms.ch/index.php/12-newsflash/227-cioms-and-iclas-release-the-new-international-guiding-principles-for-biomedical-research-involving-animals> (дата обращения: 24.06.2022).
24. Yanina I. Yu., Kozlova E. A., Kochubey V. I. Changes in the spectral characteristics of biological tissues depending on temperature // *Proc. of SPIE.* 2021. Vol. 11641. Article number 116410X. <https://doi.org/10.1117/12.2588231>
25. Inverse Adding-Doubling. URL: <https://omlc.org/software/iad/index.html> (дата обращения: 24.06.2022).
26. Тучин В. В. *Оптика биологических тканей. Методы рассеяния света в медицинской диагностике.* М. : Физматлит, 2013. 812 с.

References

1. Troy T. L., Thennadil S. N. Optical properties of human skin in the near infrared wavelength range of 1000 to



- 2200 nm. *Journal of Biomedical Optics*, 2001, vol. 6, iss. 2, pp. 167–176. <https://doi.org/10.1117/1.1344191>
2. Laufer J., Simpson R., Kohl M., Cope M. Effect of temperature on the optical properties of *ex vivo* human dermis and subdermis. *Phys. Med. Biol.*, 1998, vol. 43, pp. 2479–2489. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/43/9/004>
 3. Troy T. L., Page D. L., Sevic-Muraca E. M. Optical properties of normal and diseased breast tissues: Prognosis for optical mammography. *J. Biomed. Opt.*, 1996, vol. 1, pp. 342–355. <https://doi.org/10.1117/12.239905>
 4. Jaywant S., Wilson B., Patterson M., Lilje L., Flotte T. Temperature-dependent changes in the optical absorption and scattering spectra of tissues: Correlation with ultrastructure. *Proc. SPIE. Laser-Tissue Interaction IV*, 1993, vol. 1882. <https://doi.org/10.1117/12.148080>
 5. Nagarajan V. K., Yu B. Monitoring of Tissue Optical Properties During Thermal Coagulation of *Ex Vivo* Tissues. *Lasers in Surgery and Medicine*, 2016, vol. 48, pp. 686–694. <https://doi.org/10.1002/lsm.22541>
 6. Ao H. L., Xing D., Wei H. J., Gu H. M., Wu G. Y., Lu J. J. Thermal coagulation-induced changes of the optical properties of normal and adenomatous human colon tissues *in vitro* in the spectral range 400–1100nm. *Phys. Med. Biol.*, 2008, vol. 53, pp. 2197–2206. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/53/8/013>
 7. Thomsen S., Jacques S., Flock S. Microscopic correlates of macroscopic optical property changes during thermal coagulation of myocardium. *Proc. Laser-Tissue Interaction*, 1990, vol. 1202, iss. 2, pp. 11. <https://doi.org/10.1117/12.17605>
 8. Chung S. H., Cerussi A. E., Merritt S. I., Ruth J., Tromberg B. J. Non-invasive tissue temperature measurements based on quantitative DOS of water. *Phys. Med. Biol.*, 2010, vol. 55, pp. 3753–3765. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/55/13/012>
 9. Collins J. R. Change in the infra-red absorption spectrum of water with temperature. *Phys. Rev.*, 1925, vol. 26, pp. 0771–0779. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.26.771>
 10. Otal E. H., Inon F. A., Andrade F. J. Monitoring the temperature of dilute aqueous solutions using near-infrared water absorption. *Appl. Spectrosc.*, 2003, vol. 57, pp. 661–666. <https://doi.org/10.1366/000370203322005355>
 11. Kelly J. J., Kelly K. A., Barlow C. H. Tissue temperature by near-infrared spectroscopy. *Proc. SPIE*, 1995, vol. 2389, pp. 818–828. <https://doi.org/10.1117/12.210025>
 12. Libnau F. O., Kvalheim O. M., Christy A. A., Toft J. Spectra of water in the nearinfrared and midinfrared region. *Vib. Spectrosc.*, 1994, vol. 7, pp. 243–254. [https://doi.org/10.1016/0924-2031\(94\)85014-3](https://doi.org/10.1016/0924-2031(94)85014-3)
 13. Nachabé R., Hendriks B. H. W., Desjardins A. E., van der Voort Marjolein, Martin B. van der Mark. Estimation of lipid and water concentrations in scattering media with diffuse optical spectroscopy from 900 to 1600 nm. *Journal of Biomedical Optics*, 2010, vol. 15, no. 3, article no. 037015. <https://doi.org/10.1117/1.3454392>
 14. Merritt S. I. *Combination of broadband diffuse optical spectroscopy with magnetic resonance imaging*. PhD Thesis. University of California, Irvine, 2005. 160 p.
 15. Pimentel G. C., McClellan A. L. *The Hydrogen Bond*. San Francisco, W. Y. Freeman, 1960. 50 p.
 16. Chung S. H., Cerussi A. E., Klifa C., Baek H. M., Birgul O., Gulsen G., Merritt S. I., Hsiang D., Tromberg B. J. *In vivo* water state measurements in breast cancer using broadband diffuse optical spectroscopy. *Phys. Med. Biol.*, 2008, vol. 53, pp. 6713–6727. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/53/23/005>
 17. Buijs K., Choppin G. R. Near-infrared studies of structure of water. 1. Pure water. *J. Chem. Phys.*, 1963, vol. 39, pp. 2035–2041. <https://doi.org/10.1063/1.1734579>
 18. Hollis V. S. *Non-invasive monitoring of brain tissue temperature by near-infrared spectroscopy*. PhD Thesis. University College, London, 2002. 263 p.
 19. Belov N. P., Lapshov S. N., Patyaev A. Yu., Sherstobitova A. S., Yaskov A. D. Temperature dependence of refraction index for ethylene glycol and propylene glycol aqueous solutions. *Sci. Tech. J. Inf. Technol. Mech. Opt.*, 2012, no. 2 (78), pp. 138–139 (in Russian).
 20. Genina E. A., Bashkatov A. N., Kozintseva M. D., Tuchin V. V. OCT study of optical clearing of muscle tissue *in vitro* with 40% glucose solution. *Optics and Spectroscopy*, 2016, vol. 120, no. 1, pp. 20–27 (in Russian). <https://doi.org/10.7868/S0030403416010098>
 21. Bashkatov A. N., Berezin K. V., Dvoretzkiy K. N., Chernavina M. L., Genina E. A., Genin V. D., Kochubey V. I., Lazareva E. N., Pravdin A. B., Shvachkina M. E., Timoshina P. A., Tuchina D. K., Yakovlev D. D., Yakovlev D. A., Yanina I. Yu., Zhernovaya O. S., Tuchin V. V. Measurement of tissue optical properties in the context of tissue optical clearing. *J. Biomed. Opt.*, 2018, vol. 23, no. 9, article no. 091416. <https://doi.org/10.1117/1.JB~O.23.9.091416>
 22. Ghita A., Matousenk P., Stone N. Sensitivity of Transmission Raman Spectroscopy Signals to Temperature of Biological Tissues. *Scientific Reports*, 2018, no. 8, pp. 8379. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25465-x>
 23. *International Guiding Principles for Biomedical Research Involving Animals. CIOMS and ICLAS*. Available at: <https://www.cioms.ch/index.php/12-newsflash/227-cioms-and-iclas-release-the-newinternational-guiding-principles-for-biomedical-researchinvolving-animals> (accessed 24 June 2022) (in Russian).
 24. Yanina I. Yu., Kozlova E. A., Kochubey V. I. Changes in the spectral characteristics of biological tissues depending on temperature. *Proc. of SPIE*, 2021, vol. 11641, article no. 116410X. <https://doi.org/10.1117/12.2588231>
 25. *Inverse Adding-Doubling*. Available at: <https://omlc.org/software/iad/index.html> (accessed 24 June 2022) (in Russian).
 26. Tuchin V. V. *Optics of Biological Tissues. Methods of Light Scattering in Medical Diagnostics*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2013. 812 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 25.06.2022; одобрена после рецензирования 05.09.2022; принята к публикации 12.09.2022
The article was submitted 25.06.2022; approved after reviewing 05.09.2022; accepted for publication 12.09.2022