

МЕТОД ОЦЕНКИ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МНОГОСЛОЙНЫХ ТКАНЕЙ ЖЕЛУДОЧНО-КИШЕЧНОГО ТРАКТА *EX VIVO*

© 2025 г. А. А. Кривецкая^{a, b, *}, Т. А. Савельева^{a, b}, Д. М. Кустов^a, В. В. Левкин^c,
С. С. Харнас^c, И. Д. Романишкин^a, В. Б. Лощенов^{a, b}

^aИнститут общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук, Москва, 119991 Россия

^bНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

^cУниверситетская Клиническая больница № 1 Первого МГМУ им. Сеченова, Москва, 119992 Россия

*E-mail: annakrivetskaya1998@gmail.com

Поступила в редакцию 03.05.2024 г.

После доработки 16.05.2024 г.

Принята к публикации 17.06.2024 г.

Данная работа посвящена определению оптических свойств тканей органов желудочно-кишечного тракта человека в спектральном диапазоне 400–620 нм. Измерение спектров диффузного отражения и пропускания проводилось при помощи спектрофотометра с интегрирующей сферой Hitachi U-3400. Определение коэффициента поглощения и редуцированного коэффициента рассеяния производилось обратным методом добавления-удвоения. Полученные результаты оптических свойств были сопоставлены с имеющимися литературными данными.

Ключевые слова: оптические свойства, коэффициент поглощения, редуцированный коэффициент рассеяния, обратный метод добавления-удвоения, интегрирующая сфера

DOI: 10.56304/S2079562925010105

ВВЕДЕНИЕ

Без информации об оптических свойствах биологических тканей невозможно предугадать, как излучение в оптическом диапазоне длин волн будет взаимодействовать с исследуемыми объектами. Интраоперационное определение оптических свойств тканей органов позволяет перейти к персонализированной медицине, в частности, при проведении фотодинамической терапии, так как позволяет рассчитать необходимую световую дозу в случае конкретного пациента.

Ранее уже проводились исследования, посвященные определению оптических свойств биологических тканей. Однако в большинстве работ исследуемые объекты представляли собой образцы органов лабораторных животных [1, 2]. Существуют работы, в которых проводилось определение оптических свойств тканей органов желудочно-кишечного тракта человека. Однако в этих работах определялись свойства либо слизистой и подслизистой оболочек [3, 4], либо мышечного слоя [5], либо всей стенки органа без деления на слои [6–8]. В то время как в нашей работе проводилось исследование как слизисто-подслизистого, так и мышечно-серозного слоев, что позволяет провести более точное сопоставление оптических свойств различных слоев. Кроме того, по имеющимся в об-

щем доступе литературным данным, ранее оптические свойства тонкой кишки изучались только в отношении определения коэффициентов двухпоточковой модели Кубелки–Мунка [9], определение оптических параметров теории диффузионного приближения не производилось.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследуемые образцы представляли собой ткани желудка и тонкой кишки, отсеченные от резецированных органов пациентов после хирургических операций. Органы желудочно-кишечного тракта, такие как пищевод, желудок, тонкая и толстая кишка, представляют собой многослойные биологические объекты, состоящие из четырех оболочек: слизистой, подслизистой, мышечного слоя и серозы. Каждый слой состоит из тканей различной структуры и, соответственно, имеет различные оптические свойства. Транспортировка образцов производилась в отдельных емкостях без охлаждения и добавления дополнительных веществ. Непосредственно перед измерениями, которые проводились в тот же день, каждый образец при помощи скальпеля разделялся на слизисто-подслизистый и мышечно-серозный слои. Размеры образцов составляли примерно 1×2 см. Толщина образцов была равной 1–2 мм.

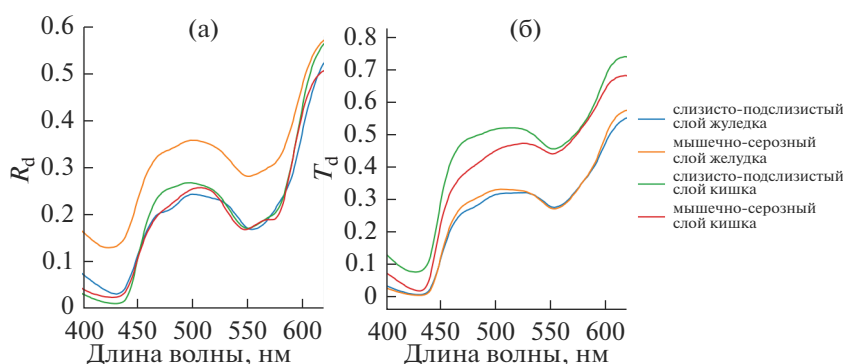


Рис. 1. Спектры диффузного отражения (а) и пропускания (б) для каждого типа исследуемых тканей.

Каждый образец помещался между предметными стеклами и исследовался в двух геометриях измерения. В первом случае образец находился со стороны интегрирующей сферы, противоположной источнику излучения, регистрировался диффузно отраженный свет; во втором — размещался между источником и сферой, детектировался сигнал диффузного пропускания. Измерения диффузно отраженного (R_d) и проходящего (T_d) излучения проводились при помощи спектрофотометра с интегрирующей сферой Hitachi U-3400.

Обработка спектров T_d и R_d проводилась при помощи языка программирования Python с использованием библиотек numpy, pandas, scipy, matplotlib и разработанной Скотом Праалем iadpython. Данные библиотеки позволяют реализовать алгоритм обратного метода добавления-удвоения, который применяется для определения оптических свойств, таких как коэффициент рассеяния (μ_s), коэффициент поглощения (μ_a) и фактор анизотропии (g). В настоящем исследовании проводилось два измерения — в проходящем и отраженном излучении с помощью интегрирующей сферы, что позволяет вычислить два параметра — коэффициент поглощения и редуцированный коэффициент рассеяния. При этом фактор анизотропии принимался равным таковому из литературных источников для исследуемых тканей.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование проводилось с использованием одного образца слизисто-подслизистого слоя желудка, четырех образцов мышечно-серозного слоя желудка, двух образцов слизисто-подслизистого слоя тонкой кишки и одного образца мышечно-серозного слоя тонкой кишки. Результаты измерений спектров диффузного отражения и пропускания приведены на рис. 1. Для типов тканей, представленных несколькими образцами, приведены усредненные значения. В области длин волн 530–590 нм наблюдаемое в спектрах снижение ин-

тенсивности сигнала обусловлено вкладом различных форм гемоглобина.

Определение оптических свойств тканей производилось при помощи обратного метода добавления-удвоения. При этом производился подбор коэффициента поглощения и редуцированного коэффициента рассеяния путем минимизации значения, полученного при вычислении выражения $(R_{cal} - R_{exp})^2 + (T_{cal} - T_{exp})^2$, где R_{exp} и T_{exp} — значения диффузного отражения и пропускания, полученные при измерениях на спектрофотометре с интегрирующей сферой, R_{cal} и T_{cal} — значения отражения и пропускания, рассчитанные путем применения прямого метода добавления-удвоения. Начальные значения оптических свойств, необходимые для применения прямого метода, были взяты из литературных источников [3–5]. Результаты определения оптических свойств слизисто-подслизистого и серозно-мышечного слоев желудка и тонкой кишки приведены на рис. 2.

При сравнении полученных значений оптических свойств с литературными данными в исследуемой в данной работе спектральной области можно отметить, что форма зависимости коэффициента поглощения аналогична представленным в других работах результатам [3–5]. Значения редуцированного коэффициента рассеяния слабо зависят от длины волны при длинах волн 400–620 нм, что совпадает с данными, приведенными в большинстве изучаемых литературных работ [3, 4]. Также полученные значения оптических свойств совпадают с приведенными в литературе по порядку величины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования были получены оптические свойства слизисто-подслизистого и мышечно-серозного слоев желудка и тонкой кишки человека. Приведенные результаты являются важными при изучении процессов взаимодействия излучения в видимом диапазоне с биологическими тканями и может применяться

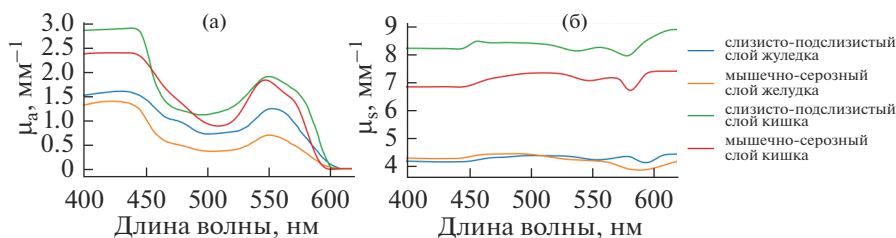


Рис. 2. Коэффициент поглощения (а) и редуцированный коэффициент рассеяния (б) для каждого типа исследуемых тканей.

для расчета необходимой мощности при персонализированном фотодинамическом воздействии.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 25-25-00516.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Джамалудинов М.Р., Исрапов Э.Х., Гиравев К.М., Гашимов И.Ш., Магомедов М.А., Ашуурбеков Н.А., // Вест. Дагестанского гос. ун-в. Сер. 1. Естеств. науки. Т. 32 (2). С. 7–18.
2. Hohmann M., Lengenfelder B., Kanawade R., Klämpfl F., Douplik A., Albrecht H. // J. Biophotonics. 2018. V. 11 (1). P. E201600187.
3. Bashkatov A., Genina E., Kochubey V., Rubtsov V., Kolesnikova E., Tuchin V. // Quantum Electron. 2014. V. 44. P. 779.
4. Bashkatov A., Genina E., Kochubey V., Gavrilova A., Kapralov S., Grishaev V., Tuchin V. // Med. Laser Appl. 2007. V. 22. P. 95–104
5. Carneiro I., Carvalho S., Henrique R., Oliveira L., Tuchin V. // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2018. V. 25. P. 7200608.
6. Sweer J.A., Chen M.T., Salimian K.J., Battafarano R.J., Durr N.J. // J. Biophotonics. 2019. V. 12 (9). P. E201900005.
7. Marchesini R., Pignoli E., Tomatis S., Fumagalli S., Sichirollo A.E., Di Palma S., Dal Fante M., Spinelli P., Croce A.C., Bottioli G. // Lasers Surg. Med. 1994. V. 15 (4). P. 351–357.
8. LaRiviere B., Ferguson N.L., Garman K.S., Fisher D.A., Jokerst N.M. // Biomed. Opt. Express. 2019. V. 10. P. 5703–5715.
9. Wei H.J., Xing D., Wu G.Y., Jin Y., Gu H.M. // World J. Gastroenterol. 2003. V. 9 (9). P. 2068–2072.
10. Qin J., Lu R. // Appl. Spectros. 2007. V. 61 (4). P. 388–396.
11. Blaney G., Sassaroli A., Fantini S. // Appl. Sci. 2022. V. 12 (21). P. 10903.
12. Shibib K., Munshid M., Abass A., Shaker D. // Iraqi Laser Scientists J. 2018. V. 2 (1). P. 36–46.
13. Ma Z., Zhao H., Tanikawa Y., Gao F. // Proc. SPIE. 2007. V. 6434. P. 64342C.
14. Prahl S.A., van Gemert M.J.C., Welch A.J. // Appl. Opt. 1993. V. 32. P. 559–568.
15. Prahl S.A. Optical Property Measurements Using the Inverse Adding Doubling Program. 1995.

Method for Assessing the Optical Properties of Multilayer Tissues of the Gastrointestinal Tract Ex Vivo

A. A. Krivetskaya^{1, 2, *}, T. A. Savelieva^{1, 2}, D. M. Kustov¹, V. V. Levkin³, S. S. Kharnas³, I. D. Romanishkin¹, and V. B. Loschenov^{1, 2}

¹ Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

² National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

³ Department of Faculty Surgery No. 1, Sechenov First Moscow State Medical University, Moscow, 119992 Russia

*e-mail: annakrivetskaya1998@gmail.com

Received May 3, 2024; revised May 16, 2024; accepted June 17, 2024

Abstract—This work is devoted to the determination of the tissue optical properties of the organs of the human gastrointestinal tract in the spectral range of 400–620 nm. The diffuse reflection and transmission spectra were measured using a Hitachi U-3400 integrating sphere spectrophotometer. The absorption and reduced scattering coefficients were determined using the inverse adding-doubling method. The obtained results of optical properties were compared with the available literature data.

Keywords: optical properties, absorption coefficient, reduced scattering coefficient, inverse adding doubling method, integrating sphere.