

## Модель влияния коэффициента поглощения среды на оптоакустический сигнал при различных концентрациях глюкозы и уровня сатурации

Д. А. Кравчук

*Для оптоакустического отклика проведены расчеты коэффициента поглощения биологической среды в зависимости от концентрации гемоглобина и сатурации крови. Приведенный метод позволит проведение диагностики состава крови на предмет количественной оценки содержания гемоглобина. Проводимые исследования позволили установить процесс увеличения коэффициента поглощения среды при увеличении концентрации глюкозы в крови и, как следствие, уменьшение амплитуды ОА сигнала. Рассчитана зависимость амплитуды ОА сигнала от коэффициента поглощения ткани при уровнях сатурации крови 60 %, 80 % и 90 %.*

*Ключевые слова:* оптоакустический эффект, коэффициент поглощения, акустический сигнал, сатурация, гемоглобин, лазер.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-5-63-66

### Введение

При оптоакустическом эффекте форма оптоакустического сигнала в большей степени определяется поглощением оптического излучения в среде: величина амплитуды акустической волны, возбуждаемой в жидкости под воздействием лазерных импульсов, прямо пропорциональна коэффициенту оптического поглощения среды. Зависимость давления от поглощённой в среде энергии можно выразить выражением:

$$p_0(\vec{r}) = \Gamma H(\vec{r}) \quad (1)$$

где  $\Gamma$  – безразмерный параметр Грюнайзена, отражающий эффективность преобразования тепла в давление.

Если лазерное излучение с интенсивностью  $E_0$  распространяется вдоль оси  $Z$  и ме-

няется по периодическому закону, то функция поглощённой в среде энергии может быть выражена как  $H(z, t) = \mu_\alpha E_0 e^{-\mu_\alpha z}$ , где  $\mu_\alpha$  – коэффициент оптического поглощения среды [1, 2].

Тогда зависимость профиля оптоакустического (ОА) сигнала от параметров среды можно выразить следующим образом:

$$p'(z) = \frac{\mu_\alpha c^2 \beta E_0}{C_p} e^{-\mu_\alpha z}, \quad (2)$$

где  $\beta$  – коэффициент изобарического расширения;  $c$  – скорость звука;  $C_p$  – теплоёмкость среды.

### Материал и методы

При проведении оптоакустического анализа изъятых из организма биожидкостей, коэффициент поглощения среды принимается за коэффициент поглощения крови. Коэффициент поглощения крови определяется коэффициентом поглощения общего гемоглобина и билирубина. Исследование крови при  $\lambda = 1064$  нм делает возможным определение концентрации глюкозы в крови, так как дан-

Кравчук Денис Александрович, к.т.н., доцент.  
E-mail: kravchukda@sfnedu.ru  
ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» ИНЭП.  
Россия, 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. «Е».

Статья поступила в редакцию 13 июля 2022 г.

© Кравчук Д. А., 2022

ная длина волны находится вблизи одного из характерных максимумов поглощения глюкозы – 1045 нм [2]. Тогда коэффициент поглощения крови ( $\mu_{blood}(\lambda)$ ) можно определить по следующей формуле:

$$\mu_{blood}(\lambda) = \mu_{Hb}(\lambda) + \ln 10 \frac{t_d C_{bil}}{M_{bil}} \mu_{bil}(\lambda) + C'_G \mu_G(\lambda) \quad (3)$$

где  $\mu_{Hb}(\lambda)$  – коэффициент поглощения общего гемоглобина;  $t_d = 5$  – отношение концентрации билирубина в крови к концентрации в окружающей ткани, зависящее от коэффициента диффузии билирубина через стенки кровеносных сосудов;  $C_{bil}$  – концентрация билирубина в тканях дермы, мг/л;  $\mu_{bil}(\lambda)$  – коэффициент поглощения билирубина (для  $\lambda = 1064$  нм составляет  $0,001 \text{ мм}^{-1}$  [4]);  $\mu_{bil} = 585$  г/моль – молярная масса билирубина;

$C'_G$  – концентрация глюкозы в крови, ммоль/л;  $\mu_G(\lambda) = 0,45 \text{ мм}^{-1}$  при  $\lambda = 1064$  нм [4–7].

Коэффициент поглощения общего гемоглобина зависит от сатурации крови следующим образом:

$$\mu_{Hb}(\lambda) = N(\lambda) \frac{C_{Hb} \ln 10}{M_{Hb}} \times \left[ \text{StO}_2 \mu_{HbO_2}(\lambda) + (1 - \text{StO}_2) \mu_{Hb}(\lambda) \right] \quad (4)$$

где  $\text{StO}_2$  – сатурация крови;  $\mu_{HbO_2}(\lambda)$  – коэффициент оптического поглощения оксигемоглобина,  $\text{мм}^{-1}$ ;  $\mu_{Hb}(\lambda)$  – коэффициент оптического поглощения дезоксигемоглобина,  $\text{мм}^{-1}$ ;  $C_{Hb} = 150$  г/л – средняя концентрация гемоглобина в крови;  $M_{Hb} = 64500$  г/моль – молярная масса гемоглобина;  $N(\lambda)$  – корректирующий коэффициент, учитывающий упаковку пигмента [4].

$$N(\lambda) = \frac{1 - \exp\left(-2d \left[ \text{StO}_2 \mu_{HbO_2}(\lambda) + (1 - \text{StO}_2) \mu_{Hb}(\lambda) \right]\right)}{2d \left[ \text{StO}_2 \mu_{HbO_2}(\lambda) + (1 - \text{StO}_2) \mu_{Hb}(\lambda) \right]} \quad (5)$$

Однако, при проведении ОА неинвазивного анализа необходимо также учитывать влияние слоёв эпидермиса и дермы на поглощение излучения. Общий коэффициент поглощения рассчитывается как сумма коэффициентов поглощения отдельных компонент с весовыми коэффициентами, равными их объёмным концентрациям [6]. Таким образом, результирующий коэффициент поглощения можно выразить следующей формулой [9–11]:

$$\mu_{tot}(\lambda) = f_{epi} \mu_{epi}(\lambda) + f_{derma} \mu_{derma}(\lambda) + f_{blood} \mu_{blood}(\lambda), \quad (6)$$

где  $f_{epi}$ ,  $f_{derma}$  и  $f_{blood}$  – весовые коэффициенты для слоя эпидермиса, дермы и крови;  $\mu_{epi}(\lambda)$  – коэффициент поглощения эпидермиса;  $\mu_{derma}(\lambda)$  – коэффициент поглощения дермы. В общем случае весовые коэффициенты определяются как отношение толщины слоя к концентрации пигмента в этом слое.

Так, для эпидермиса толщина слоя составляет от 50 до 150 мкм, а концентрация

пигмента определяется содержанием меланина в ткани. Толщина слоя дермы составляет порядка 600 мкм, концентрация пигмента определяется объёмной концентрацией капилляров. Для крови толщину слоя определим равной среднему диаметру кровеносного сосуда (5–65 мкм), а концентрацию пигмента положим равной концентрации гемоглобина.

## Результаты

Проведём анализ влияния концентрации глюкозы на коэффициент оптического поглощения среды.

Для анализа влияния коэффициента поглощения на амплитуду давления ОА сигнала, положим все переменные кроме  $\mu_a$  постоянными величинами.

Учитывая линейный характер зависимости коэффициента поглощения от концентрации глюкозы, представим график зависимости амплитуды ОА сигнала от концентрации глюкозы. В норме концентрация глюкозы составляет от 3,5 до 5,5 ммоль/л, однако при нару-

шении обменных процессов диапазон значений данного параметра увеличивается. На рис. 1 приведена зависимость амплитуды ОА сигнала от концентрации глюкозы.

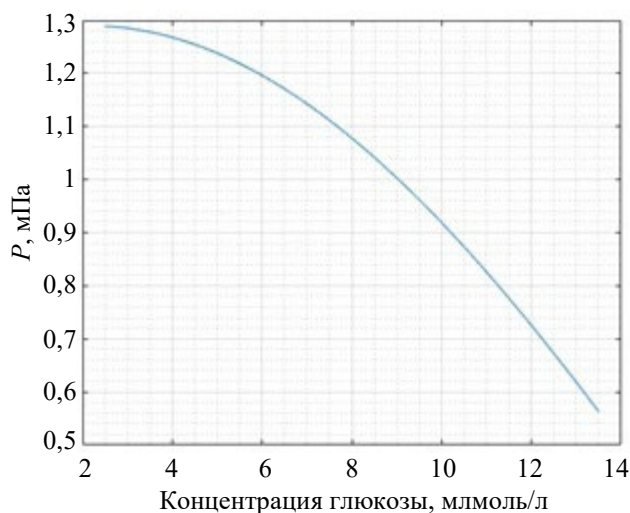


Рис. 3. Зависимость амплитуды ОА сигнала от концентрации глюкозы

Сатурация крови также влияет на коэффициент оптического поглощения среды, на рис. 2 представлены зависимости общего коэффициента поглощения от концентрации глюкозы при разных степенях обогащения крови кислородом.

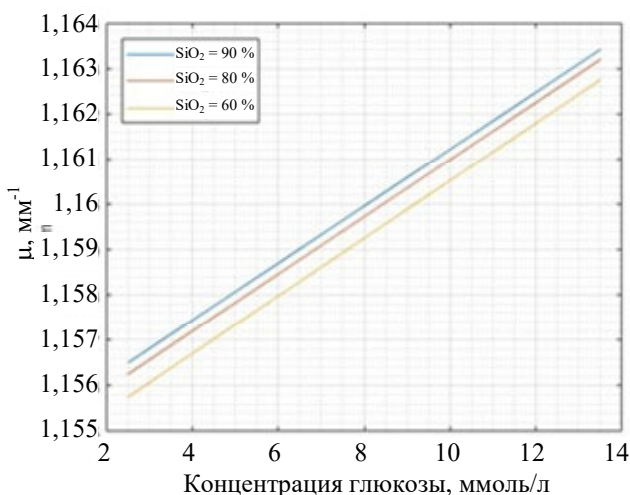


Рис. 2. Зависимость общего коэффициента поглощения от концентрации глюкозы при разных уровнях сатурации крови

На рис. 3 показано изменение амплитуды ОА сигнала в зависимости от коэффициента поглощения среды при разных уровнях кислородонасыщения крови и с учётом меняющегося расстояния до моделей эритроцитов.

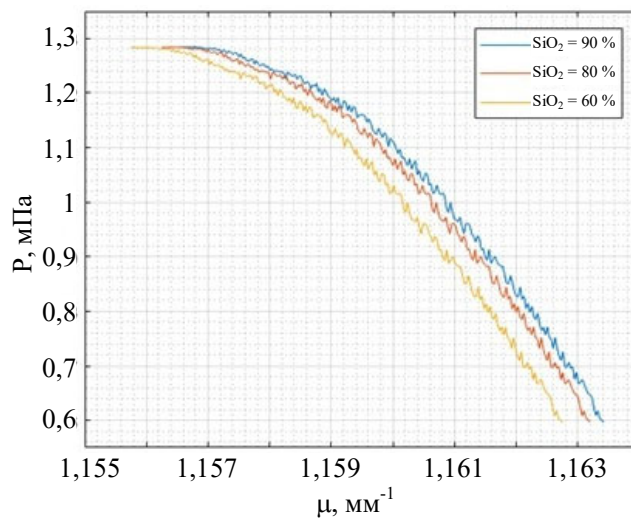


Рис. 5. Зависимость амплитуды ОА сигнала от коэффициента поглощения ткани при разных уровнях сатурации крови

По графику, приведённому на рис. 5, можно сделать вывод об ослаблении амплитуды ОА сигнала при уменьшении сатурации крови.

### Заключение

В результате работы были выявлены закономерности изменения амплитуды оптоакустического сигнала, вызванные вариациями коэффициента поглощения среды. В качестве параметров, влияющих на коэффициент поглощения, были выбраны концентрация глюкозы и уровень сатурации крови [1, 12, 13].

При математическом моделировании ОА отклика от модельной среды были получены следующие результаты:

- выявлено ослабление амплитуды ОА сигнала при уменьшении кислородонасыщения крови;
- выявлено увеличение коэффициента поглощения среды при увеличении концентрации глюкозы в крови и, в связи с этим, уменьшение амплитуды ОА сигнала.

В данной работе рассматривалось изменение акустического сигнала, вызванное изменением коэффициента поглощения и флуктуацией расстояния до модельных эритроцитов, остальные параметры оставались постоянными.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гусев В. Э., Карабутов А. А. Лазерная оптоакустика. – М.: Наука, 1991.

2. Кравчук Д. А., Старченко И. Б., Орда-Жигулина Д. В., Воронина К. А. // Акустический журнал. 2021. № 67. С. 345.
3. Гарипов И. И. // Вестник Казанского технологического университета. 2014. № 18.
4. Кожохина Е. В. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 2(72). С. 157.
5. Nachabe R., Evers D. J., Hendriks B. H., Lucassen G. W., van der Voort M., Wesseling J., Ruers T. J. // Biomedical Optics Express. 2011. Vol. 2. P. 600.
6. Лысенко С. А. Методы оптической диагностики биологических объектов. – Минск: БГУ, 2014. ISBN 978-985-518-982-5.
7. Zhang H. F. et al. // Appl. Phys. Lett. 2007. Vol. 90. № 5. P. 053901.
8. Swearingen J. A. et al. // SPIE. 2010. Vol. 15. № 1. P. 016019. <https://doi.org/10.1117/1.3316297>.
9. Kruger R. A. et al. // Med. Phys. 2010. Vol. 37. № 11. P. 6096.
10. Zhang H. F. et al. // Nat. Biotechnol. 2006. Vol. 24. № 7. P. 848.
11. Cai C. et al. // Anal. Cell. Pathol. 2016. Vol. 2016.
12. Кравчук Д. А. // Прикладная физика. 2021. № 6. С. 63.
13. Kravchuk D. A., Voronina K. A. // J. Biomed. Photonics Eng. 2020. Vol. 6. № 1. P. 010307.

PACS: 42.62.Be

## Model of the influence of the absorption coefficient of the medium at various concentrations of glucose and saturation level on the optoacoustic signal in the blood

D. A. Kravchuk

Southern Federal University  
Bld. E, 2 Schevchenko st., Taganrog, 347922, Russia

*Received July 13, 2022*

***On the basis of the optoacoustic effect, the absorption coefficient of the biological medium was calculated depending on the hemoglobin concentration and blood saturation. The above method will allow for the diagnosis of blood composition for a quantitative assessment of hemoglobin content. The ongoing studies made it possible to establish the process of increasing the absorption coefficient of the medium with an increase in the concentration of glucose in the blood and, as a result, a decrease in the amplitude of the OA signal. The dependence of the OA signal amplitude on the tissue absorption coefficient was calculated at blood saturation levels of 60 %, 80 %, and 90 %.***

**Keywords:** optoacoustic effect, absorption coefficient, acoustic signal, saturation, hemoglobin, laser.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-5-63-66

### REFERENCES

1. V. E. Gusev and A. A. Karabutov, *Lasernay optoacoustic*. (Nauka, Moscow, 1991) [in Russian].
2. D. A. Kravchuk, K. A. Voronina, I. B. Starchenko, and D. V. Orda-Zhigulina, *Acoustical physics* **67**, 345 (2021).
3. I. I. Garipov, *Bulletin of the Kazan Technological University*, No. 18 (2014) [in Russian].
4. E. V. Kozhokhina, *Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics*, No. 2(72), 157 (2011) [in Russian].
5. R. Nachabe, D. J. Evers, B. H. Hendriks, G. W. Lucassen, M. van der Voort, J. Wesseling, and T. J. Ruers, *Biomedical Optics Express* **2**, 600 (2011).
6. S. A. Lisenko, *Metody opticheskoi diagnostiki biologicheskikh ob"ektov*. (Minsk, 2014). ISBN 978-985-518-982-5 [in Russian].
7. H. F. Zhang, et al., *Appl. Phys. Lett.* **90** (5), 053901 (2007).
8. J. A. Swearingen, et al., *SPIE* **15** (1), 016019 (2010). <https://doi.org/10.1117/1.3316297>.
9. R. A. Kruger, et al., *Med. Phys.* **37** (11), 609 (2010).
10. H. F. Zhang, et al., *Nat. Biotechnol.* **24** (7), 848 (2006).
11. C. Cai, et al., *Anal. Cell. Pathol.* **2016** (2016).
12. D. A. Kravchuk, *Applied Physics*, No. 6, 63 (2021) [in Russian].
13. D. A. Kravchuk and K. A. Voronina, *J. Biomed. Photonics Eng.* **6** (1), 010307 (2020).