

Картирование оксигенации крови по

двухволновым оптоакустическим

измерениям методами машинного обучения

R&D день

Центров ИИ

Перекатова В.В.^{1,2}, Куракина Д.А.^{1,2}, Кириллин М.Ю.^{1,2}



Точное измерение оксигенации крови (sO_2) является одной из наиболее актуальных задач количественной оптоакустической (ОА) визуализации в связи с важностью этого параметра в ряде экспериментальных и клинических приложений, тесно связанных с функциональной диагностикой и выбором стратегии лечения. Был разработан алгоритм на основе машинного обучения для 3D попиксельного картирования sO_2 на основе ОА данных на длинах волн 532 и 1064 нм. Обучение алгоритма было проведено на данных *in silico*, полученных в ходе моделирования методом Монте-Карло поглощенной энергии и эмпирической инструментальной функции ОА установки.

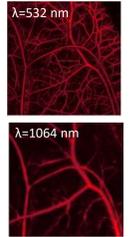
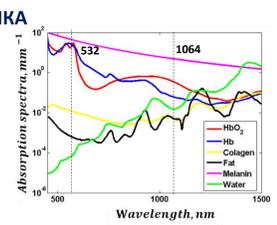
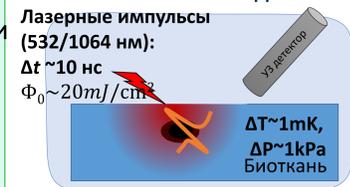
Измерение оксигенации крови

$$sO_2 = \frac{C_{HbO_2}}{C_{HbO_2} + C_{Hb}}$$

C_{HbO_2} , C_{Hb} - концентрации окси- и дезоксигемоглобина

- Приложения:
- ✓ Анализ гемодинамики мозга
 - ✓ Оценка воздействия на опухоли химио- и лучевой терапии
 - ✓ Мониторинг регенерации тканей при трансплантации

ОПТОАКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА



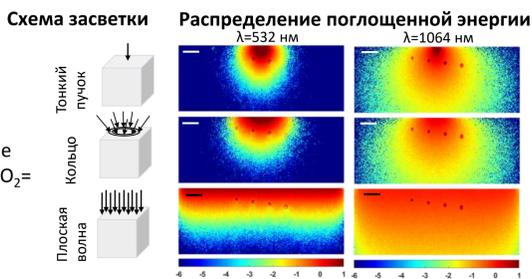
$$p(\vec{r}, \lambda) = \Gamma \int A(\vec{r} - \vec{r}') \mu_a(\vec{r}', \lambda) \Phi(\vec{r}', \lambda) d^3 r'$$

$\Phi(\vec{r}', \lambda)$ - освещенность внутри биоткани
 $\mu_a(\vec{r}', \lambda)$ - коэф. оптического поглощения

$A(\vec{r} - \vec{r}')$ - аппаратная функция ОА системы
 $p(\vec{r}, \lambda)$ - измеренный сигнал давления

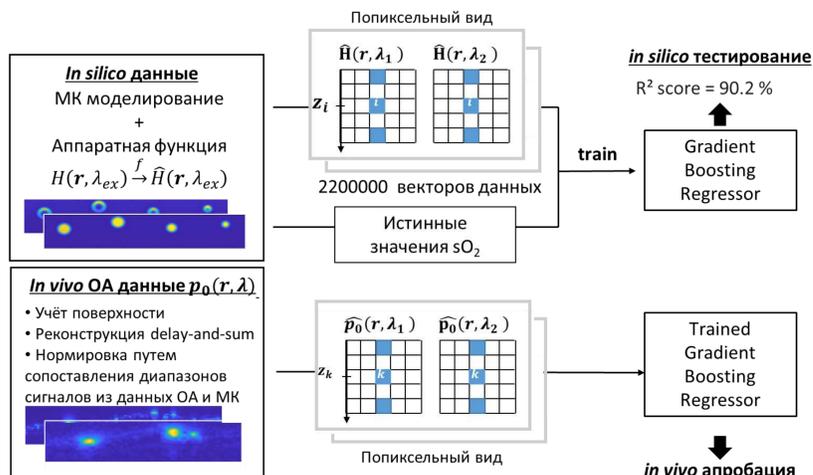
Монте-Карло моделирование

Размеры биоткани: 20x20x6 мм³
Число фотонов: 10⁷
Длины волн: 532 и 1064 нм
Модель окружающей биоткани: ухо кролика
Контраст поглощения: цилиндрические сосуды с $d = 0,03 \div 1$ мм, $z_d = 0,1 \div 1$ мм, $sO_2 = 0 \div 1$
Тип источника: кольцо, тонкий пучок, плоская волна
Оптические свойства для МК моделирования: биоткань *, кровь **



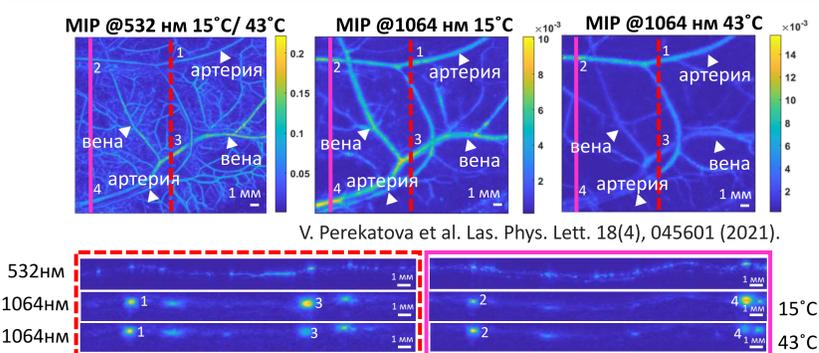
*T. Kono, J. Yamada. Int. J. Thermophys. 40(5), 1-14 (2019).
**N. Bosschaert et al. Las. Med Sci. 29(2), 453-79 (2014).

Метод оценки оксигенации крови: машинное обучение



Вектор данных: $[z_i, \hat{H}(z_i, \lambda_1), \hat{H}(z_i, \lambda_2), \hat{H}(z_{i-2}, \lambda_1), \hat{H}(z_{i-2}, \lambda_2), \hat{H}(z_{i+2}, \lambda_1), \hat{H}(z_{i+2}, \lambda_2)]$

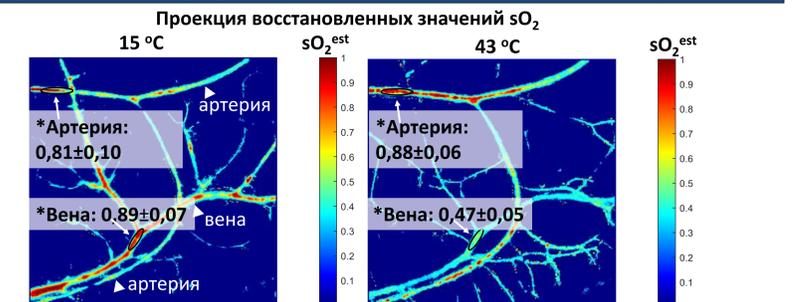
In vivo ОА данные: мониторинг артериовенозного анастомоза



V. Perekatova et al. Las. Phys. Lett. 18(4), 045601 (2021).

ОА визуализация уха кролика на длинах волн 532 и 1064 нм при различных температурах качественно демонстрирует феномен артериовенозного анастомоза как ответ биоткани на экстремальные температурные условия

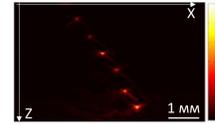
Апробация алгоритма картирования реконструкции на in vivo ОА данных



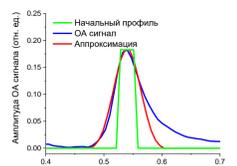
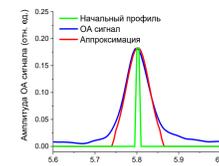
D. Kurakina et al. Las. Phys. Lett. 21, 035601 (2024)

* Сравнимо с G. Yin et al. J. Appl. Phys. 106, 013109 (2009).

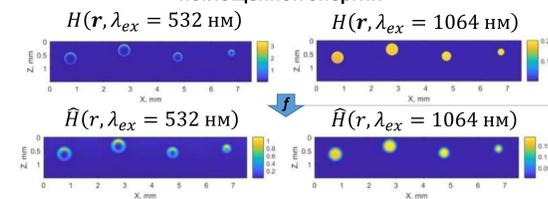
Восстановленное ОА изображение медной проволоки с d = 30 мкм



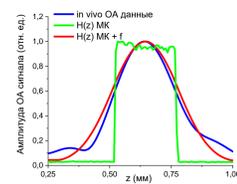
Экспериментальное определение аппаратной функции f



Применение аппаратной функции ОА системы f к картам поглощенной энергии

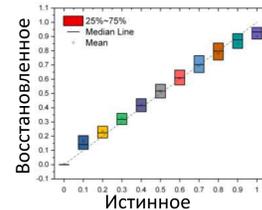


Сравнение ОА in vivo и H

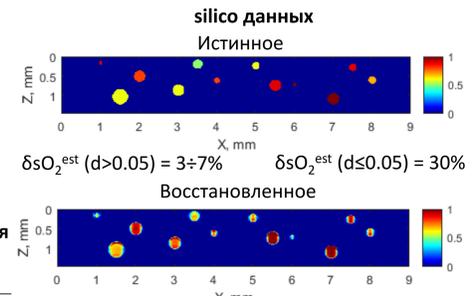


Апробация алгоритма на in silico данных

Оценка точности алгоритма на тестовой выборке



Результаты валидации на независимых in silico данных



*Сопоставимо с C. Bench et al. J. Biomed. Opt. 25, 085003 (2020)

**Сопоставимо с G.P. Luke et al arXiv:1911.01935 (2019)

***Сопоставимо с J.Groh et al Sci.Rep. 11,6565 (2021)

D. Kurakina et al. Las. Phys. Lett. 21, 035601 (2024)

Метрики для оценки качества обучения алгоритма	
Метрика	Значение
R^2	90,2%
MAE	6,5% (*4,4%, ***5.1%)
MedAE	4,4% (**5,1%, ***10%)

- Разработан новый алгоритм трехмерного попиксельного картирования sO_2 по ОА измерениям на длинах волн 532 и 1064 нм на основе метода градиентного бустинга. Обучение алгоритма проводилось на *in silico* данных о распределениях поглощенной энергии для длин волн зондирования 532 и 1064 нм в тканеподобных васкуляризованных средах, полученных с помощью метода Монте-Карло. Применение эмпирической аппаратной функции ОА-системы позволило избежать ресурсозатратного решения прямой акустической задачи
- Разработанный алгоритм позволил картировать sO_2 на основе *in vivo* спектральных ОА данных для уха кролика, демонстрируя значения sO_2 $0,89 \pm 0,07$ для вен и $0,81 \pm 0,10$ для артерий во время артериовенозного анастомоза; после прерывания артериовенозного анастомоза sO_2 снижается в венах до $0,47 \pm 0,05$ и увеличивается до $0,88 \pm 0,06$ в артериях. Разработанный алгоритм демонстрирует перспективы картирования sO_2 по ОА изображениям и может быть использован для различных биомедицинских приложений при количественной ОА визуализации.

1 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского" (ННГУ)

2 Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»

Group contact: valeriya1000@yandex.ru, mkirillin@yandex.ru