

# Картирование оксигенации крови по

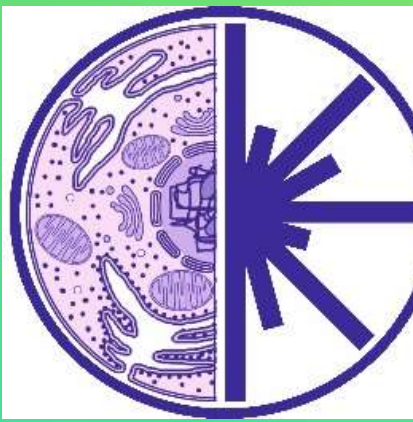
# двухволновым оптоакустическим

# измерениям методами машинного обучения

R&D день

Центров ИИ

Перекатова В.В.<sup>1,2</sup>, Куракина Д.А.<sup>1,2</sup>, Кириллин М.Ю.<sup>1,2</sup>



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

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

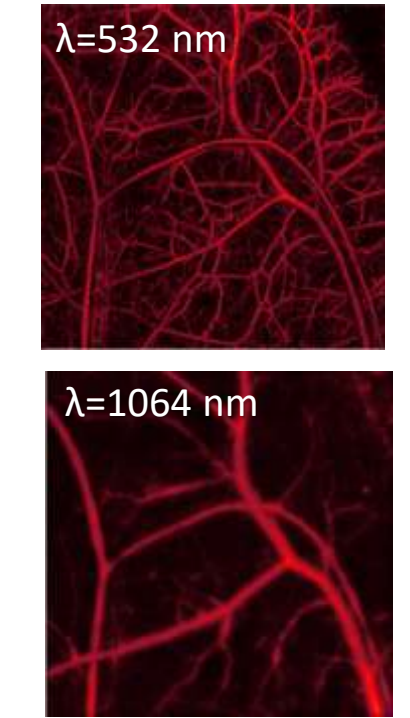
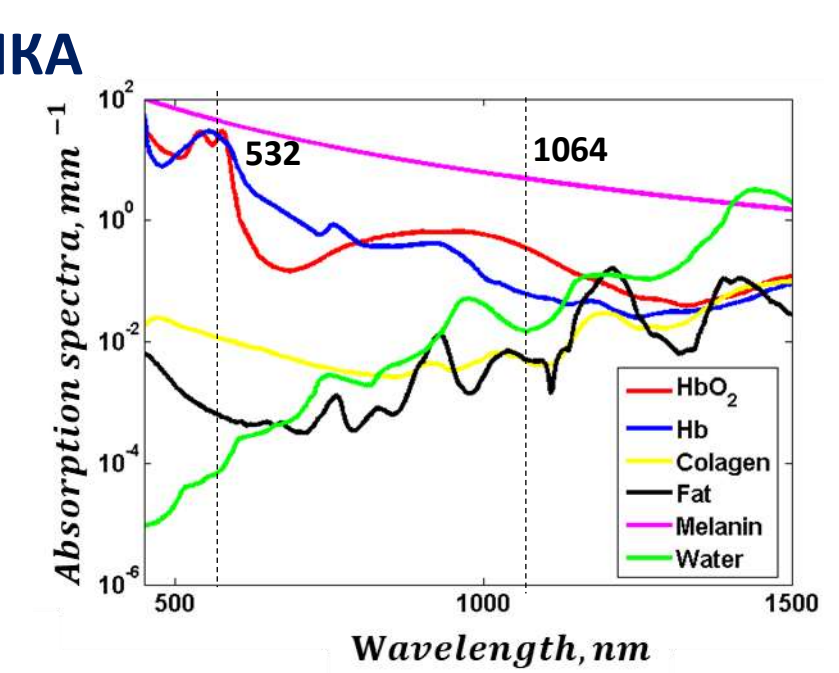
$C_{HbO_2}$ ,  $C_{Hb}$  - концентрации окси- и дезоксигемоглобина

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

### ОПТОАКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

Лазерные импульсы (532/1064 нм):  
 $\Delta t \sim 10$  нс  
 $\Phi_0 \sim 20$  мДж/см<sup>2</sup>

$\Delta T \sim 1$  мК,  
 $\Delta P \sim 1$  кПа  
 Биоткань



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

$\Phi(\vec{r}', \lambda)$  - 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 мм<sup>3</sup>

Число фотонов: 10<sup>7</sup>

Длины волн: 532 и 1064 нм

Модель окружающей биоткани:

ухо кролика

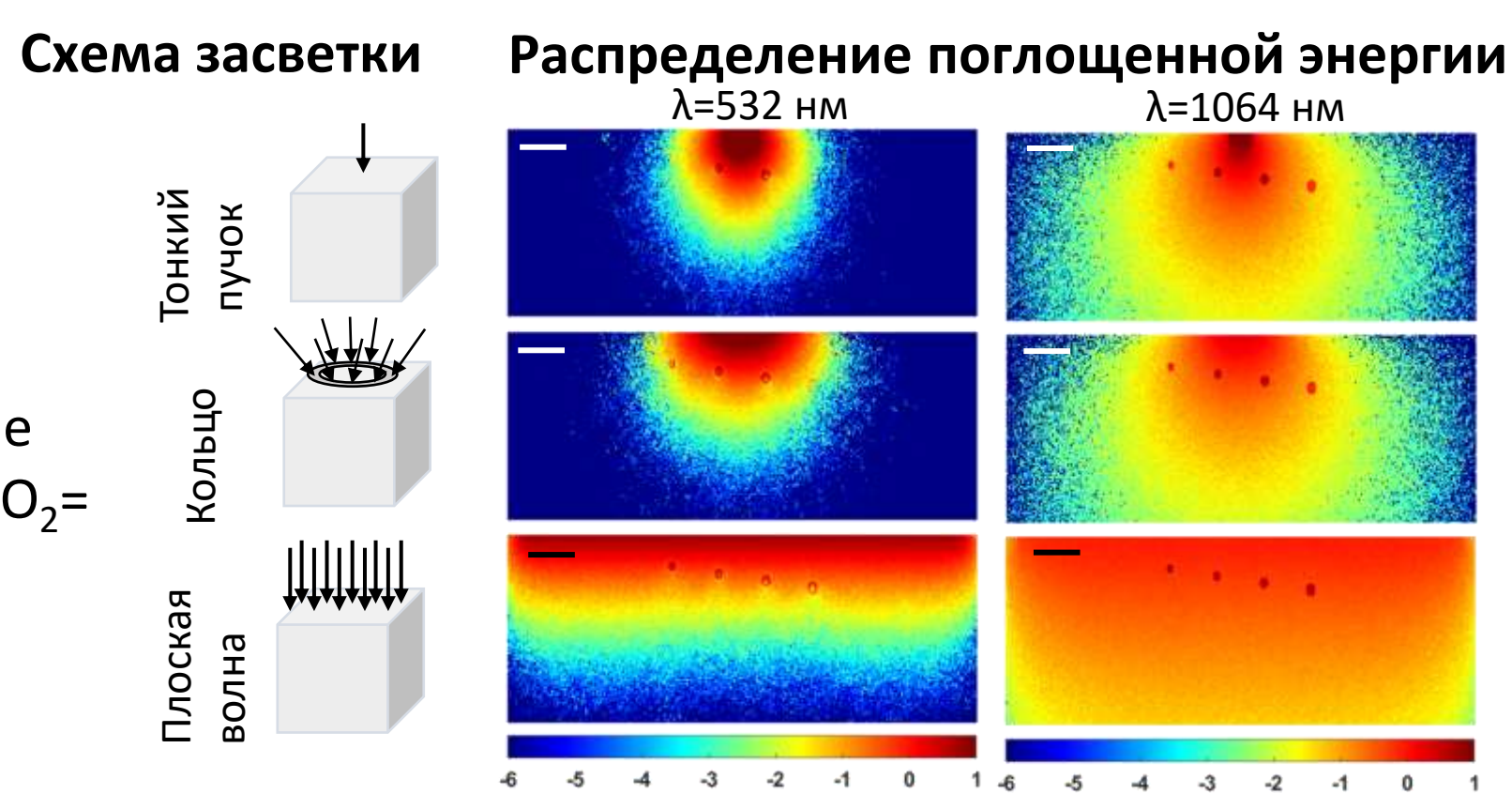
Контраст поглощения: цилиндрические сосуды с  $d = 0,03 \div 1$  мм,  $z_d = 0,1 \div 1$  мм,  $sO_2 = 0 \div 1$

Тип источника:

кольцо, тонкий пучок, плоская волна

Оптические свойства для МК

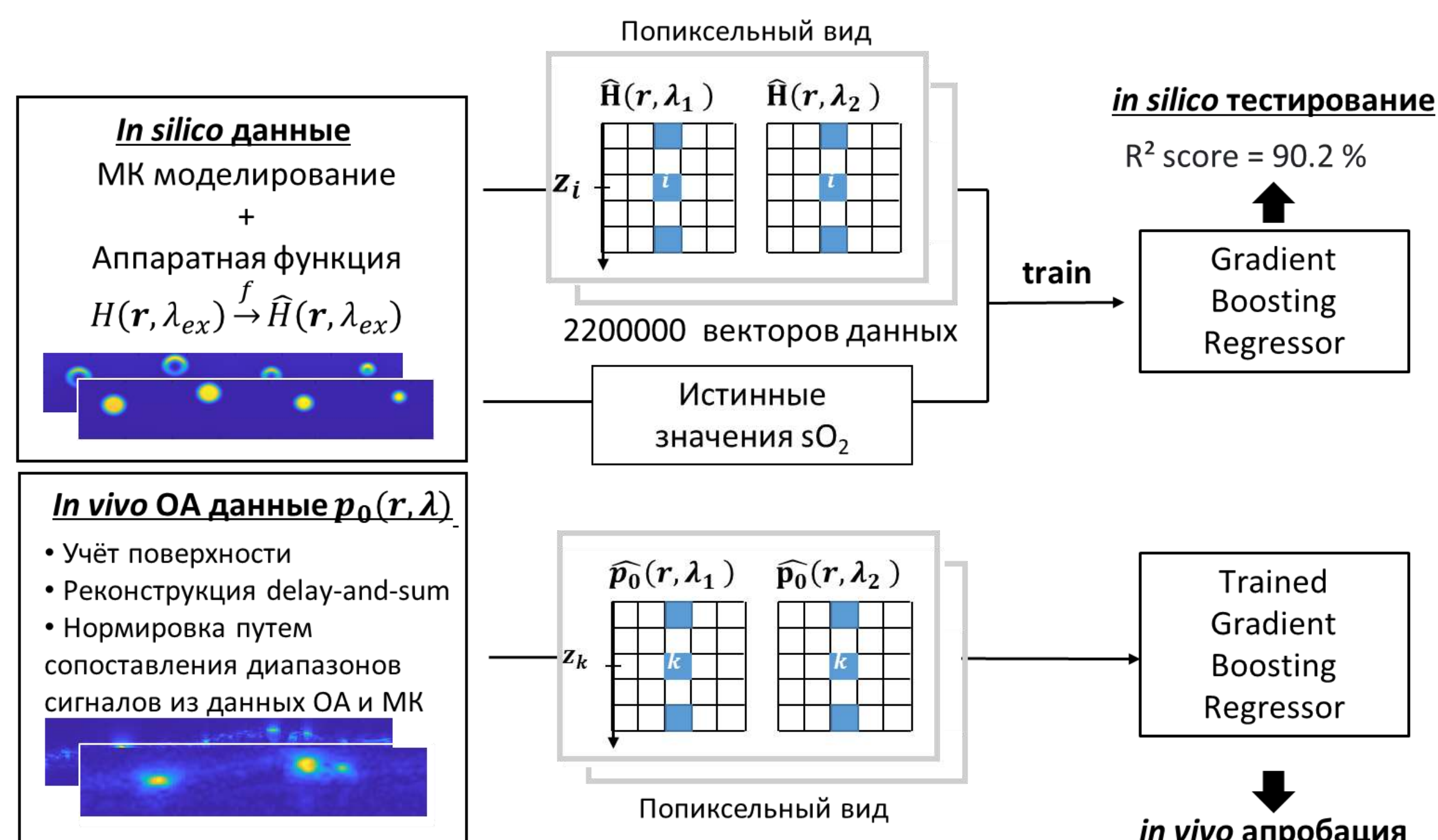
моделирования: биоткань \*, кровь \*\*



\*T. Kono, J. Yamada. Int. J. Thermophys. 40(5), 1-14 (2019).

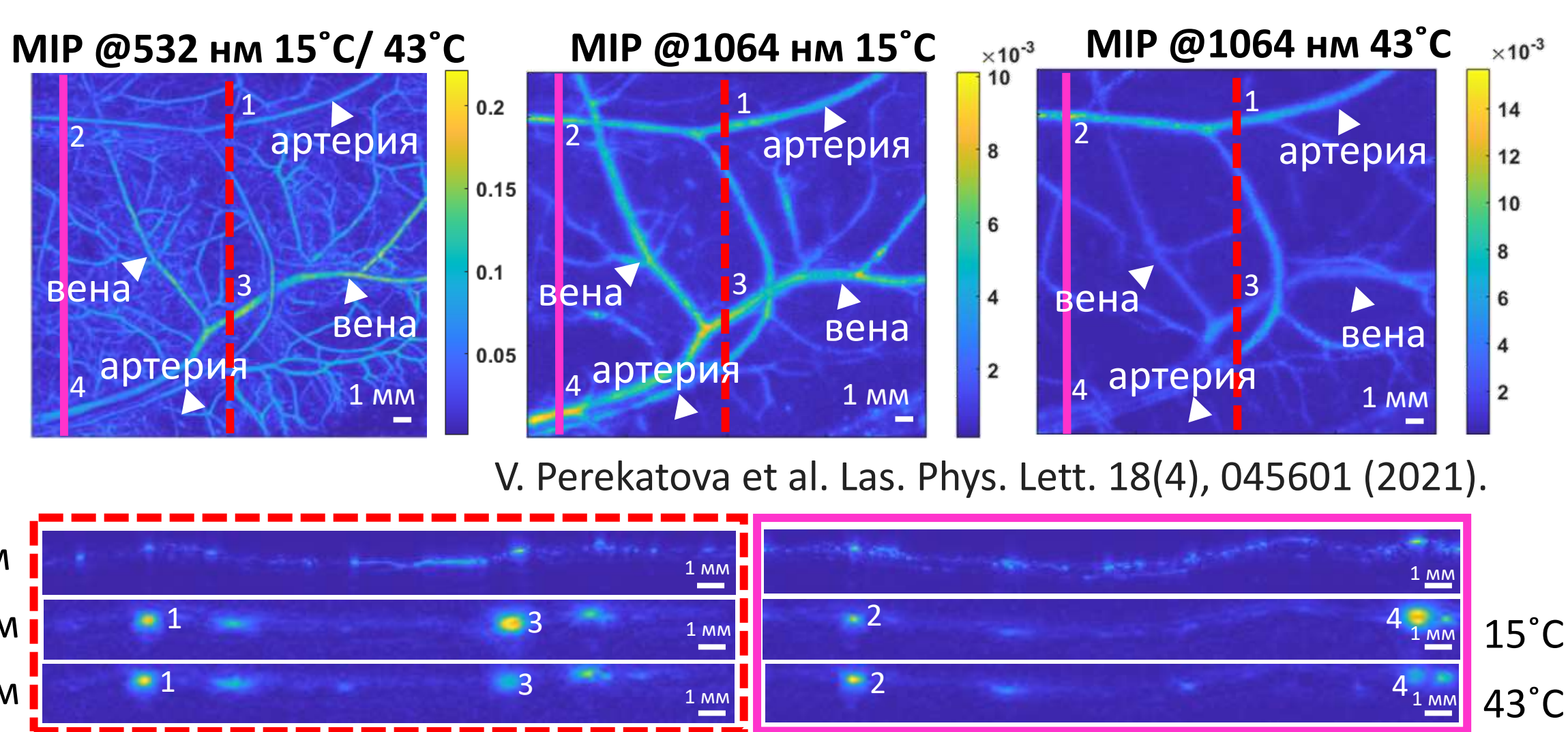
\*\*N. Bosschaert et al. Las. Med Sci. 29(2), 453-79 (2014).

## Метод оценки оксигенации крови: машинное обучение



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

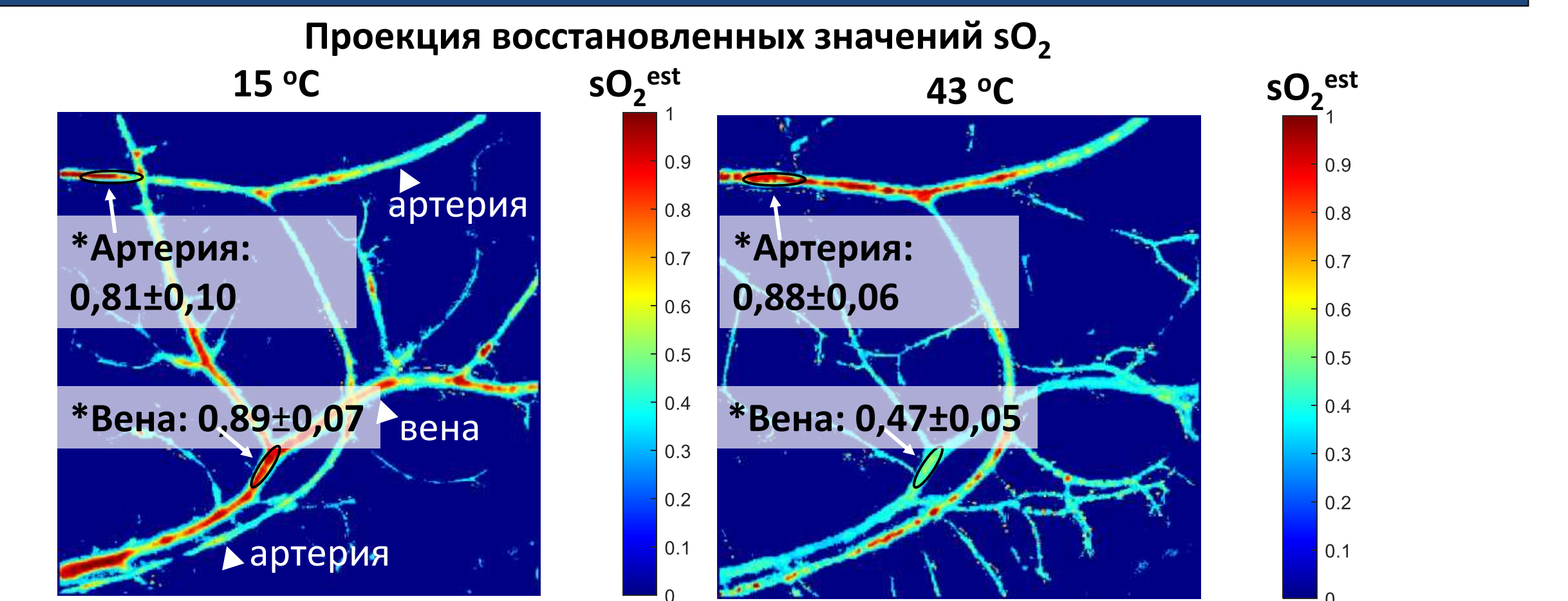
## In vivo ОА данные: мониторинг артериовенозного анастомоза



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

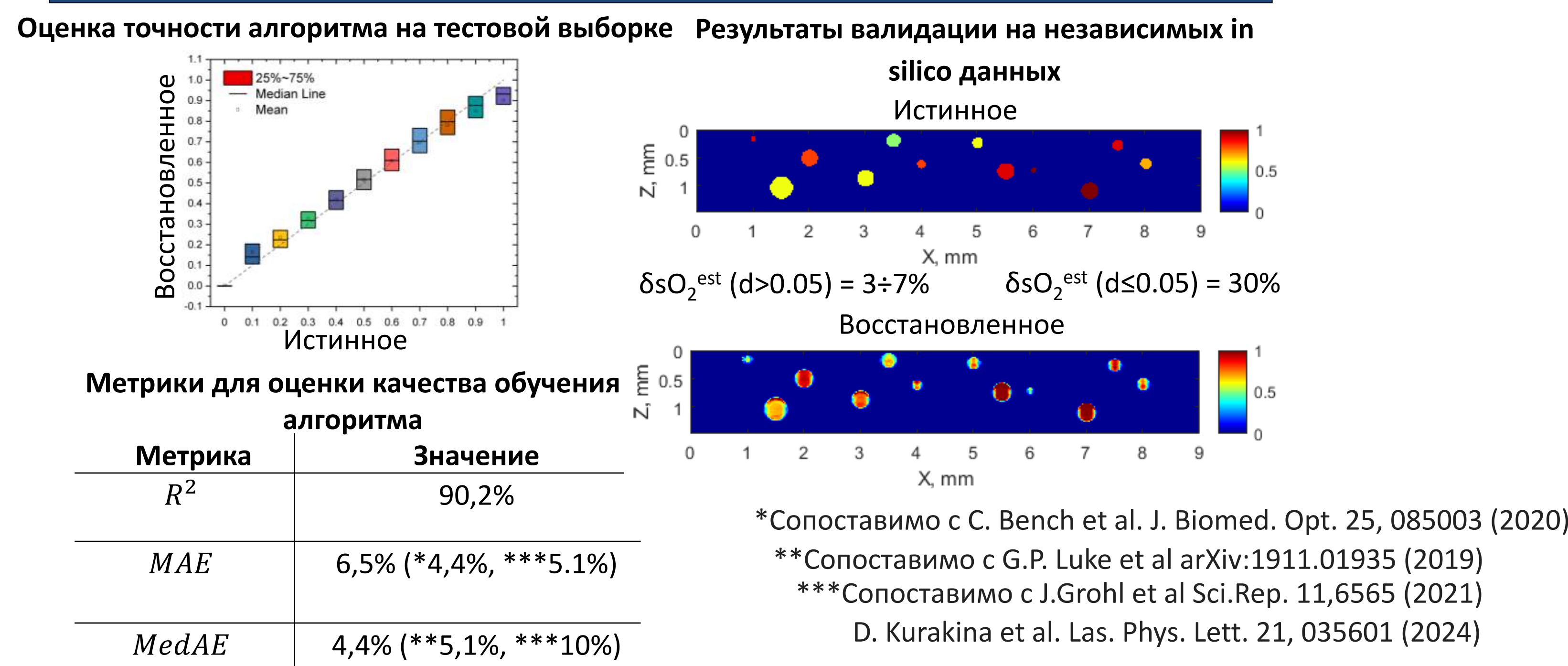
## Апробация алгоритма картирования реконструкции на in vivo ОА данных



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

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

## Апробация алгоритма на in silico данных



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](mailto:valeriya1000@yandex.ru), [mkirillin@yandex.ru](mailto:mkirillin@yandex.ru)