

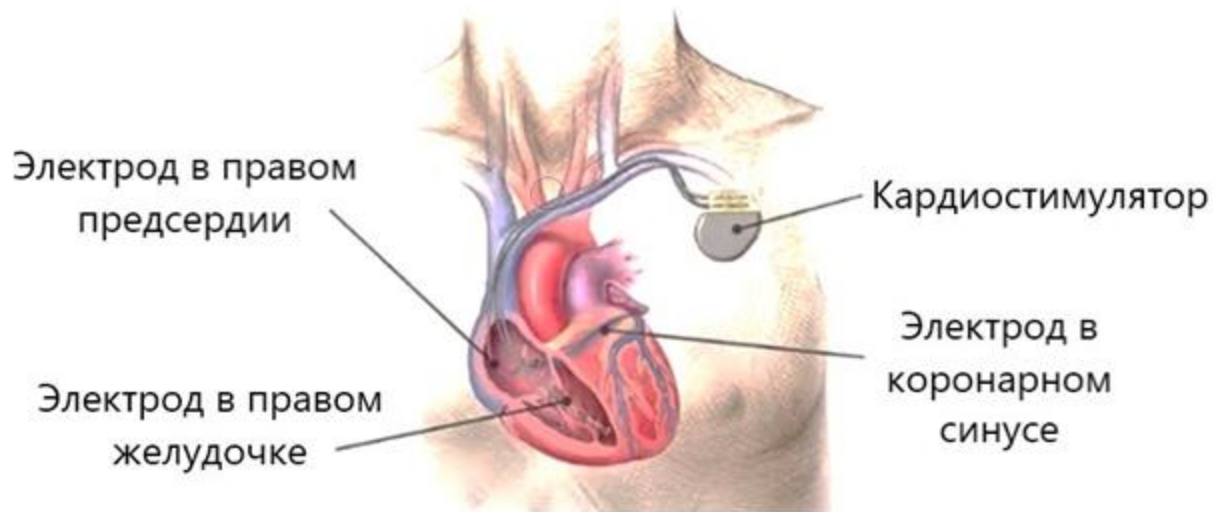


# Персонализация параметров электрофизиологической модели сердца человека

Кабак В.Ю., Рокеах Р.О., Нестерова Т.М., Джигиль М.А.,  
Чумарная Т.В., Соловьева О.Э.  
ИИФ УрО РАН, лаборатория математической  
физиологии

# Постановка проблемы

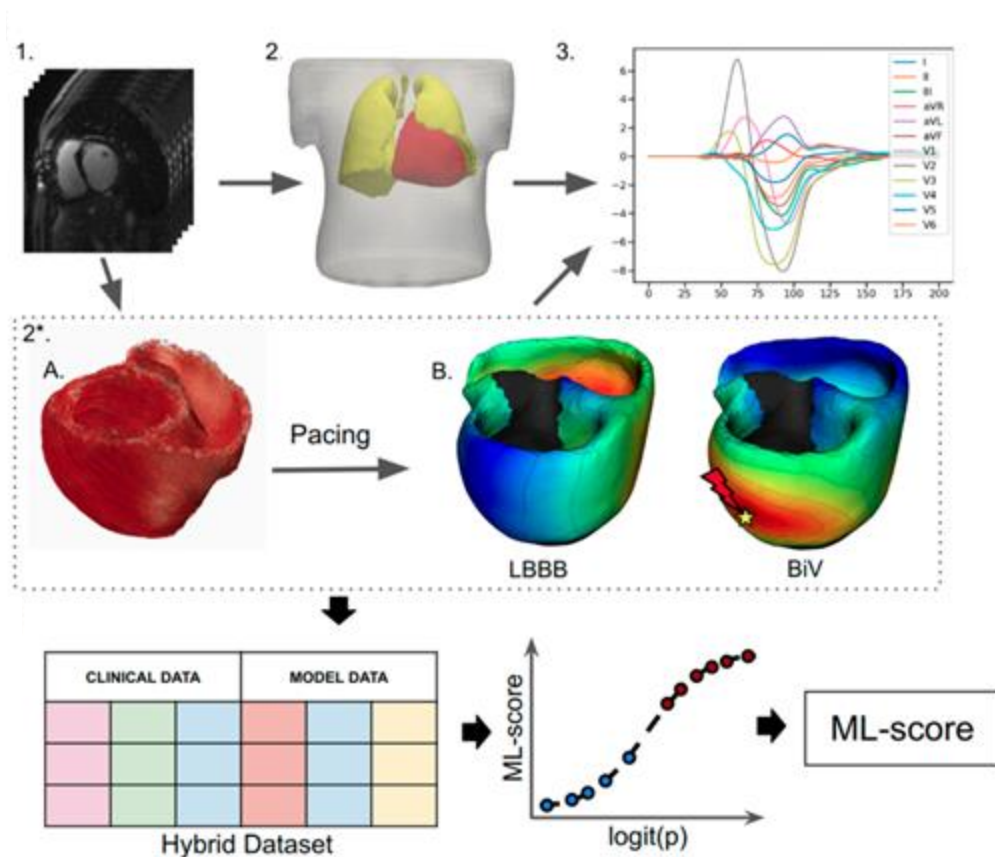
- Сердечная ресинхронизирующая терапия (СРТ) - стандарт в лечении пациентов с хронической сердечной недостаточностью (ХСН)
- До 30 % пациентов не отвечают на СРТ
- Может быть связано с неверным отбором пациентов и неоптимальной стимуляцией сердца (сложная анатомия коронарных вен, фиброз или рубец от инфаркта)



Имплантированное устройство СРТ

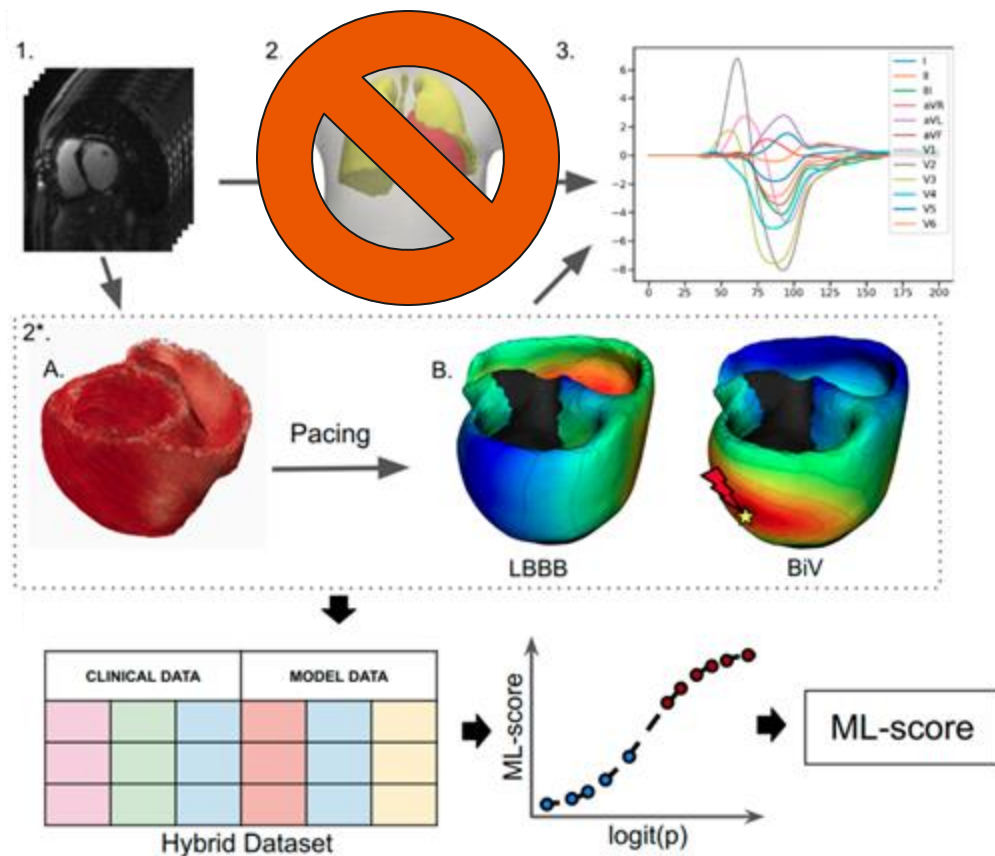
# Постановка проблемы

- Используется набор данных 56 пациентов с ХСН и блокадой левой ножки пучка Гиса, прошедших СРТ
- Построены персонализированные электрофизиологические модели желудочков с возможностью расчета ЭКГ
- Комбинация клинических и модельных индексов передается на вход классификатору
- ML-классификатор для предсказания ответа на СРТ (увеличение фракции выброса на 10 %)
- Accuracy = 0.82, f1-score = 0.81



# Постановка проблемы

- Рассчитанная моделью ширина комплекса QRS (QRSd) должна соответствовать клинической
- Персонализация (калибровка) модели проводится путем подбора глобального коэффициента проводимости миокарда ( $\sigma$ )
- Что делать, если отсутствует сегментация торса и легких, необходимая для расчета ЭКГ?
- Можно ли предсказывать QRSd, имея лишь модель желудочков?





## Цель

---

- Исследование связи между проводимостью миокарда, характеристиками активации желудочков и ЭКГ и разработка алгоритма определения персональной проводимости миокарда в электрофизиологических моделях сердца без прямого расчета модельного ЭКГ

# Задачи



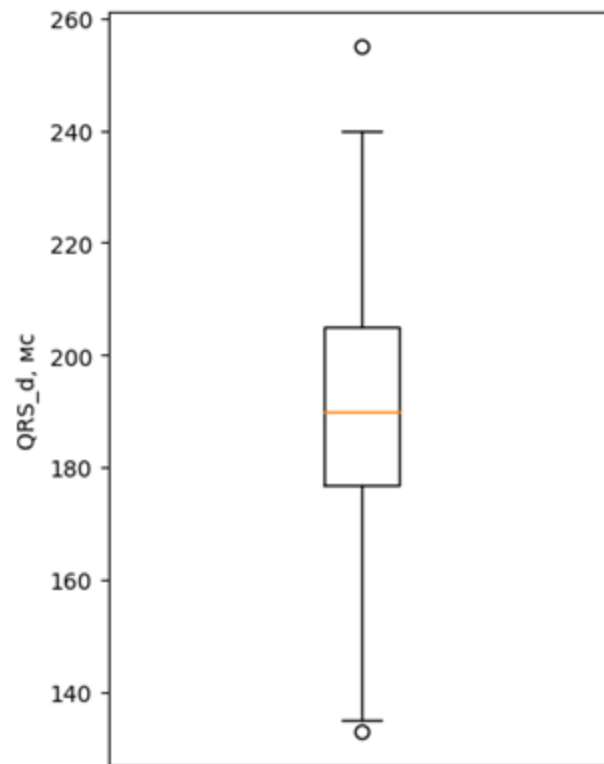
1. Исследовать зависимость TAT от проводимости миокарда путем проведения численных экспериментов.
2. Построить регрессионную модель, описывающую зависимость QRSd от TAT на всем диапазоне проводимостей.
3. Описать итоговый алгоритм поиска персональной проводимости при помощи клинических данных ЭКГ и электрофизиологической модели желудочков.

Total Activation Time (**TAT**) - время активации 95 % объема миокарда

QRS duration (**QRSd**) - медиана ширины комплекса QRS по 12 отведениям ЭКГ

## Методы

- 56 пациентов с ХСН, которым в период с августа 2016 по август 2019 года была проведена имплантация устройства СРТ
- Широкий комплекс QRS ( $>120$  мс)
- Клинические данные предоставлены НМИЦ им. В. А. Алмазова, СПб

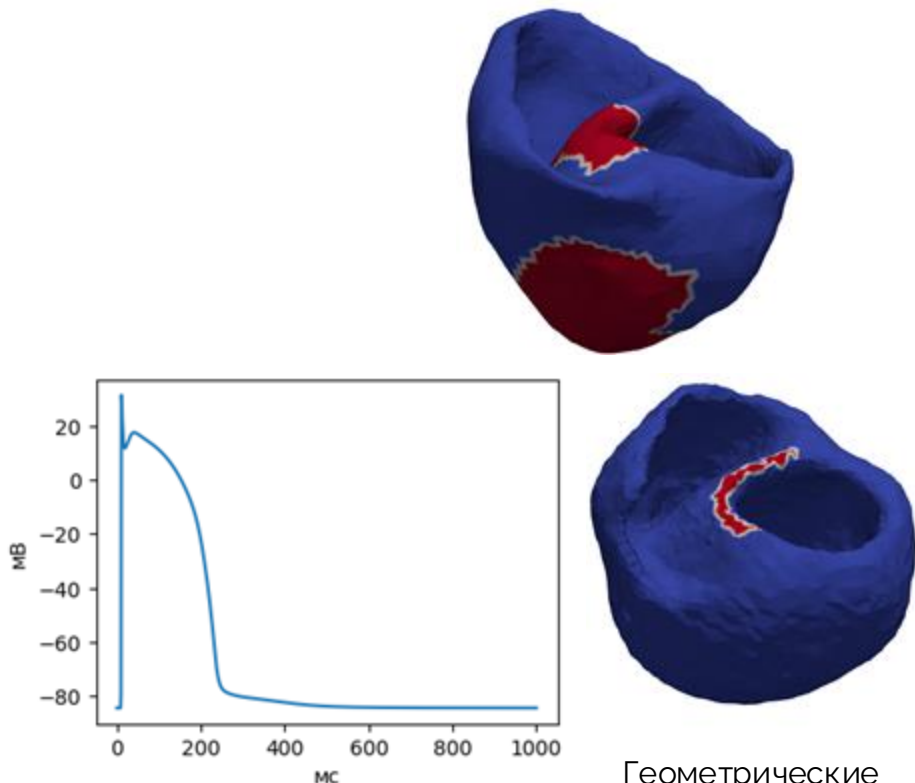


Распределение QRSd для 56 пациентов

# Методы

- Персонализированная геометрия сердца, легких и туловища на основе КТ. Выделение зон структурных повреждений по данным МРТ
- Задание:
  1. Универсальной системы координат [1].
  2. Направления миокардиальных волокон [2].
  3. Проводящей системы и блока проведения в ножке ЛЖ [3]. Задание в
- Использован предрассчитанный потенциал действия TNNP [4]

- [1] Bayer et al., 2018. doi: 10.1016/j.media.2018.01.005  
[2] Bayer et al., 2012. doi: 10.1007/s10439-012-0593-5  
[3] Costabal et al., 2016. doi: 10.1016/j.jbiomech.2015.12.025  
[4] ten Tusscher et al., 2006. doi: 10.1152/ajpheart.00109.2006

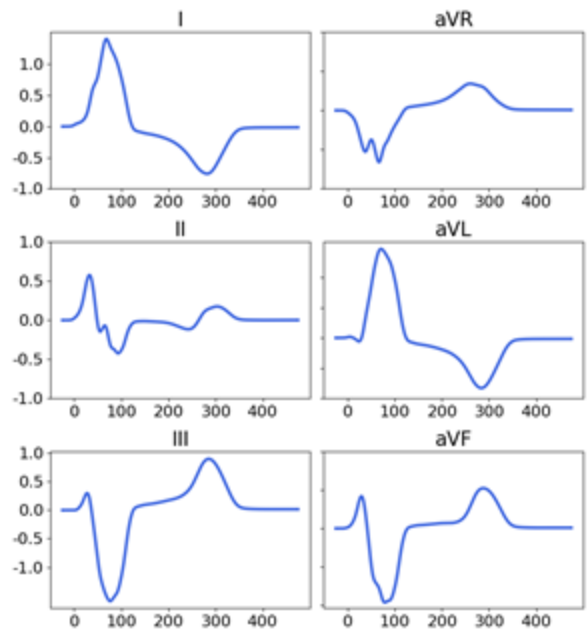
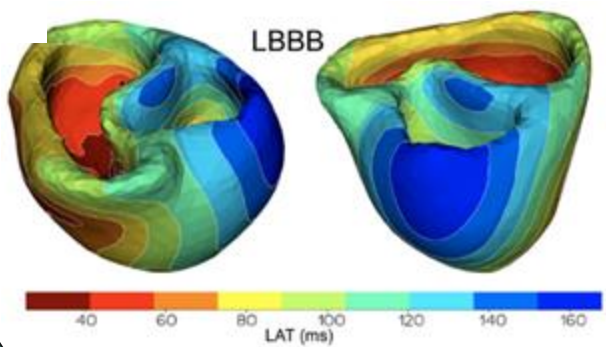
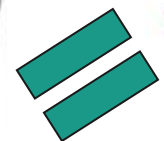
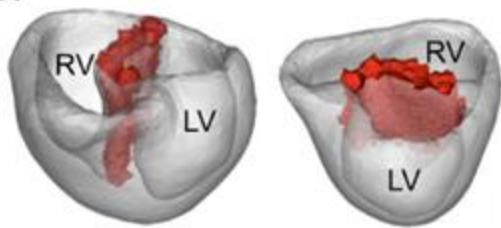


Потенциал действия TNNP

Геометрические модели с отмеченными повреждениями



# Методы



$$\begin{cases} \sqrt{\nabla t_a^T \mathbf{V} \nabla t_a} = 1 & \text{in } \Omega \\ t_a = t_0 & \text{in } \Gamma \end{cases}$$

$\mathbf{V}$  - тензор электрической проводимости (задает параметр  $\sigma$ ), задается анизотропия  
 $\Omega$  - объем миокарда,  
 $t_a$  - положительная функция, описывающая локальное время активации

Khamzin et al., 2021.  
 doi: 10.3389/fphys.2021.753282

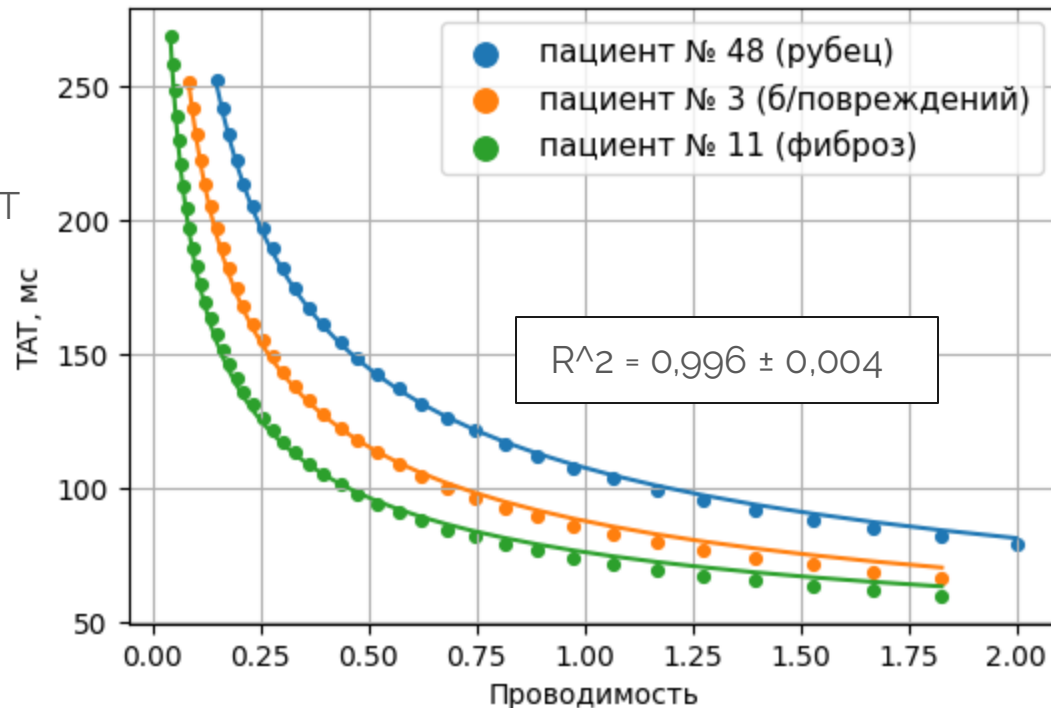
# Результаты

- Проведены численные эксперименты по выявлению зависимости между TAT и проводимостью миокарда
- Построенные кривые аппроксимируются уравнением:

$$\text{TAT}(\sigma) = a + b / \sigma^{(0.5)},$$

где a и b - персональные параметры

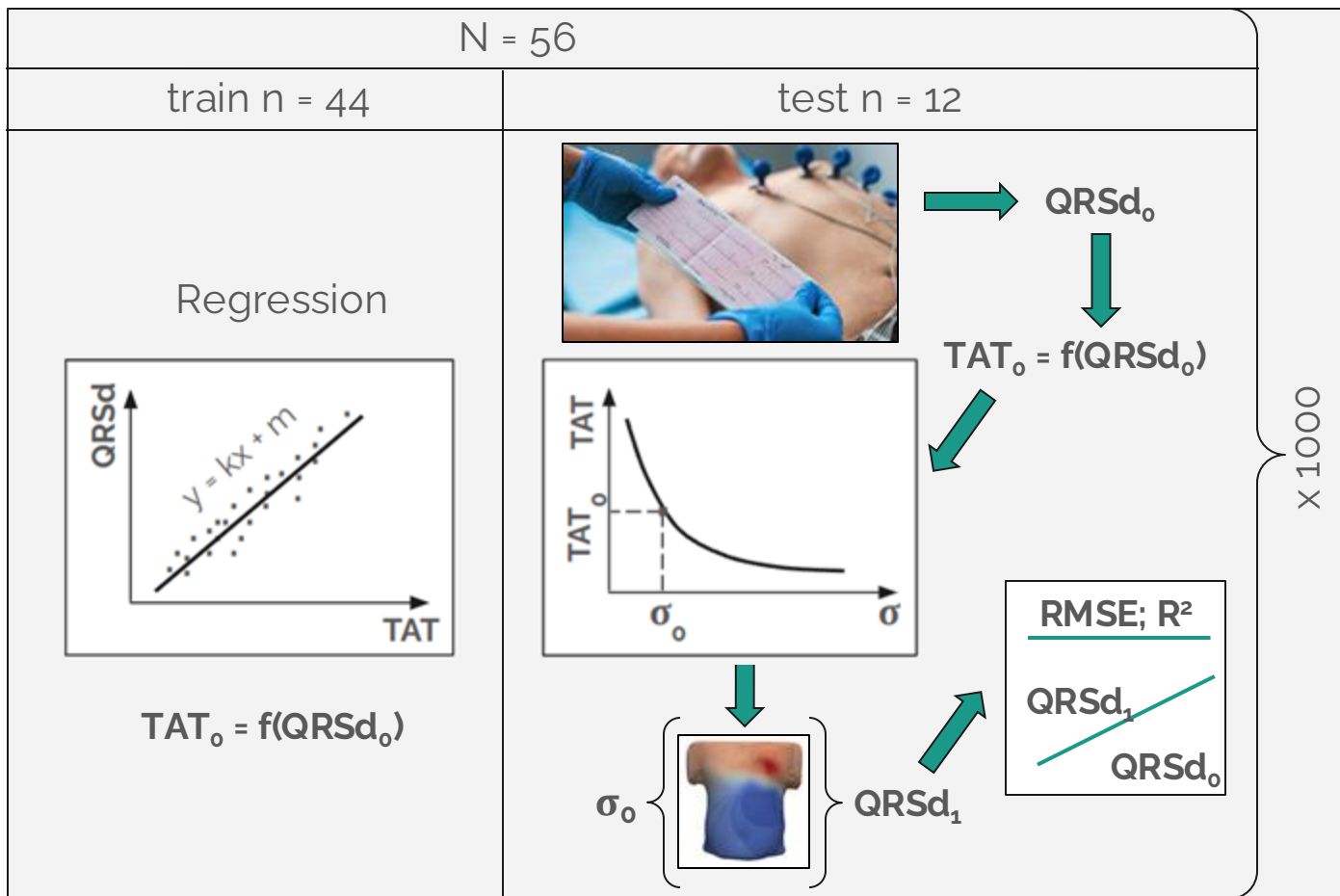
	a	b
mean	24.152506	67.354716
std	6.090619	12.099703
min	4.766749	45.928948
max	38.388329	95.063624



Зависимость **TAT** от  $\sigma$ : расчетные данные (точки) и данные, описываемые аналитической кривой (сплошная линия) для трех пациентов

# Проверка

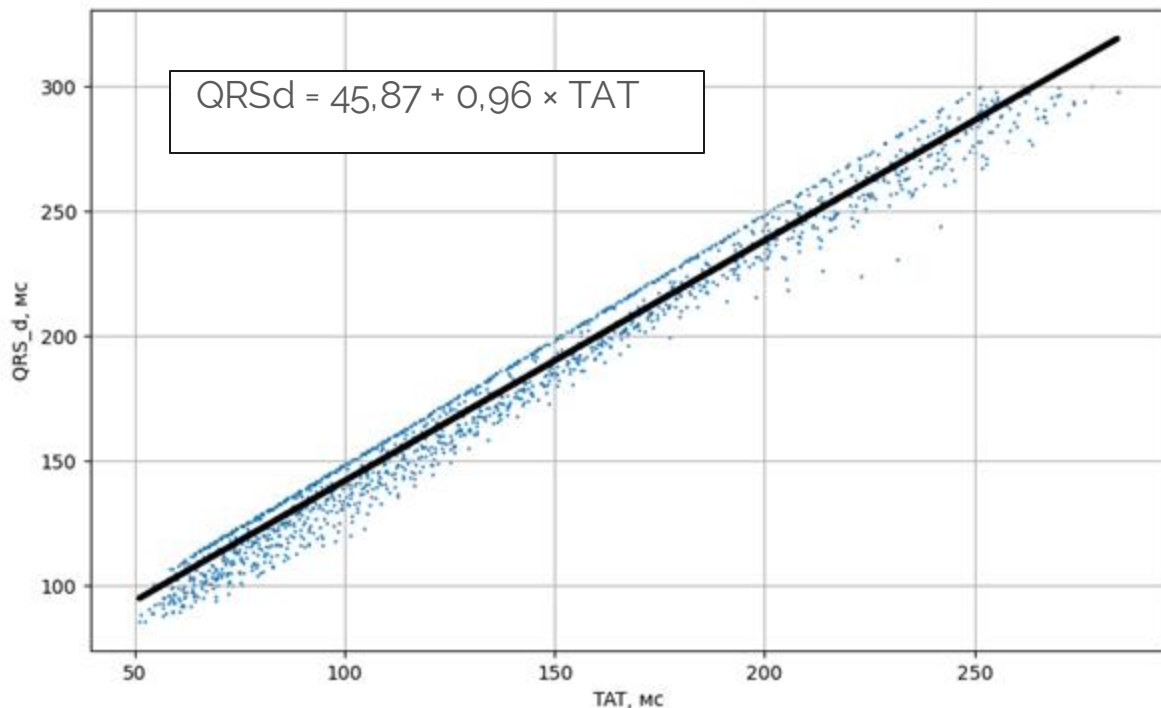
- Расчет TAT не требует модели торса
- Меньше расчетов



# Результаты

- Выявлена линейная зависимость между выходными значениями
- Торс не нужен?

	r2	rmse
count	1000.000000	1000.000000
mean	0.945781	5.226622
std	0.031587	0.901121
min	0.677988	2.466234
5%	0.887840	3.748079
25%	0.933900	4.598476
50%	0.954170	5.212942
75%	0.965467	5.877490
95%	0.978003	6.722473
max	0.988052	7.554939



Зависимость QRSd от TAT на всем диапазоне проводимостей для всех пациентов

## Обсуждение

- Итоговый алгоритм:
  - Имея персонализированную модель желудочков конкретного пациента, построить зависимость  $TAT(\sigma)$ .
  - Определить коэффициенты  $a$  и  $b$  в формуле (1).
  - Найти проводимость, используя формулу при известном  $QRSd$ (2).

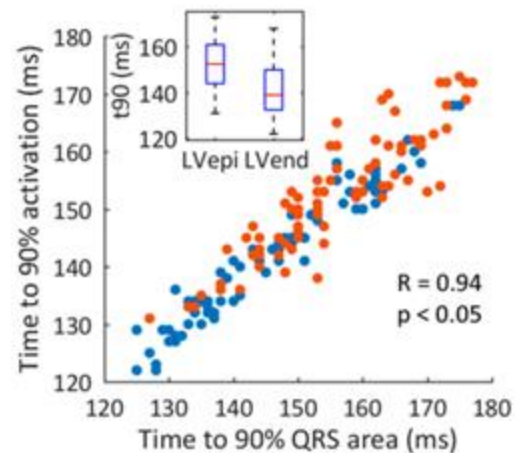
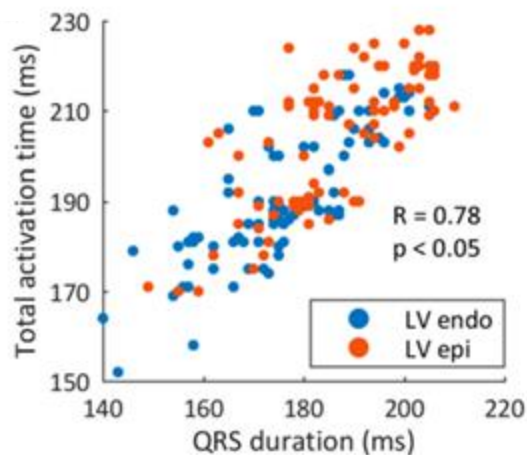
$$TAT(\sigma) = a + b / \sigma^{(0.5)}, \quad (1)$$

$$\sigma = \left( \frac{b}{\frac{QRSd - 45,87}{0,96} - a} \right)^2, \quad (2)$$

$QRSd$  - клиническое значение

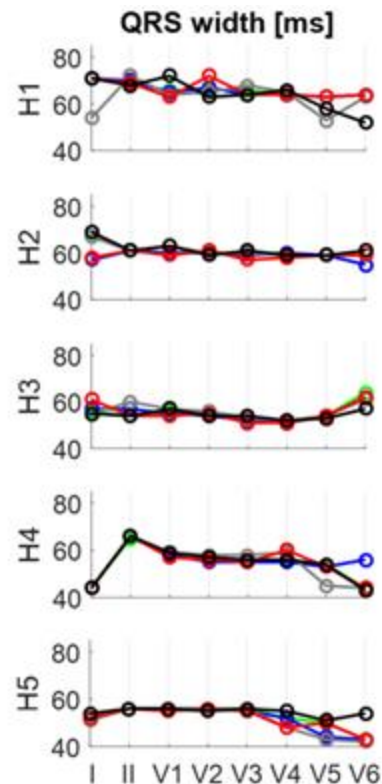
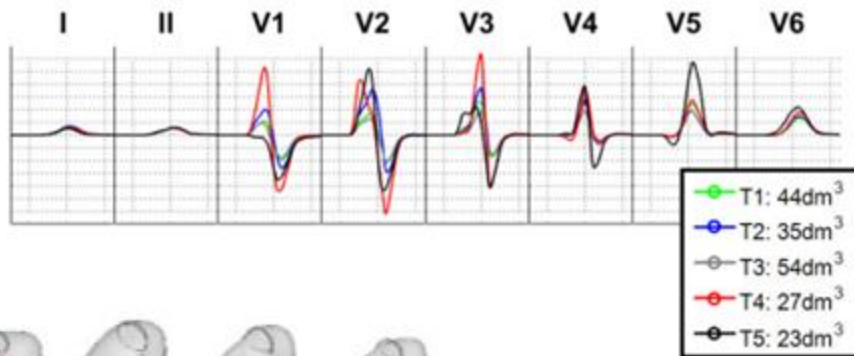
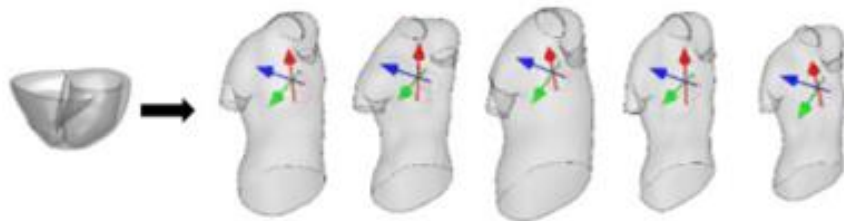
# Обсуждение

- Модель желудочков
- Для электрофизиологии использовалась монодоменная модель
- Для расчета ЭКГ - бидоменная модель (золотой стандарт)
- В случае стимуляции наблюдается выраженная корреляция между  $TAT_{90}$  и  $t_{90}QRSarea$
- Корреляция между TAT и QRSd умеренная



# Обсуждение

- В исследовании Minchole et al.\*\* исследовалось влияние анатомии на QRS комплекс
- Бидоменная модель
- 5 моделей сердец
- 5 моделей торса
- Различия на V2 минимальны



# Заключение

1. Изучена взаимосвязь параметра проводимости  $\sigma$  и TAT. Предложена формула для определения персональной проводимости.
2. Была построена линейная регрессионная модель, описывающая зависимость QRSd от TAT, следовательно при определении персональной проводимости по клиническим данным можно пользоваться только моделью желудочков.
3. Предложен алгоритм поиска персональной проводимости при помощи клинических данных ЭКГ и электрофизиологической модели желудочков.





# Спасибо за внимание!

- Благодарность научному руководителю Соловьевой Ольге Эдуардовне
- И коллегам по гранту РФФИ № 24-15-00335



Уральский  
федеральный  
университет

имени первого Президента  
России Б.Н.Ельцина



**ИНСТИТУТ ИММУНОЛОГИИ И ФИЗИОЛОГИИ  
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**