

Неинвазивная вычислительная оценка  
гемодинамических индексов (FFR, CFR и iFR)  
с учетом остаточной миокардиальной ишемии  
XV конференция “Математические модели и численные методы  
в биологии и медицине”  
Москва, ИВМ РАН, 2 ноября, 2023

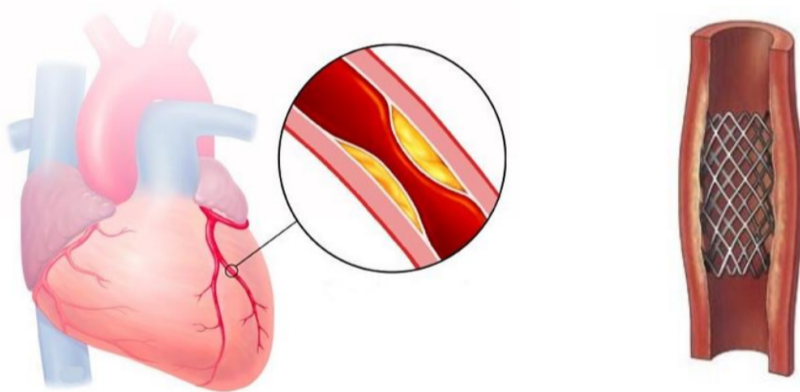
С.С. Симаков, Т.М. Гамилов, А.А. Данилов



SECHENOV  
UNIVERSITY



# Актуальность



**Гемодинамическая значимость???**

## Актуальность

- Повторные ишемические события после проведения чрезкожного коронарного вмешательства (ЧКВ, PCI) в отдаленной перспективе в 30 – 50% случаев.
- Влияние состояния микроциркуляторного русла на основные гемодинамические коэффициенты (FFR, iFR, CFR), характеризующие функциональную значимость области стеноза для коронарного кровотока.
- Прямые измерения FFR, iFR, CFR требуют специализированного оборудования, медикаментов, имеют высокую стоимость, инвазивные (проводятся внутри тела пациента).

## 1D и 0D объекты в физиологии



Figure: Камеры сердца, аневризмы, лимфатические узлы, альвеолы

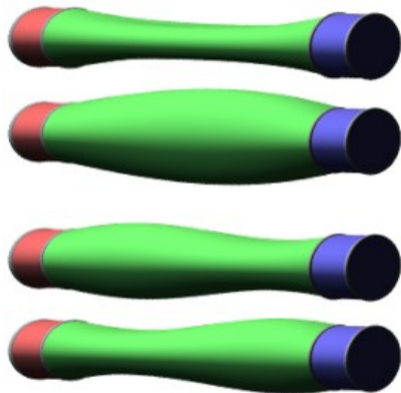


Figure: Артерии и вены, лимфатические сосуды, бронхиолы

## Одномерная (1D) модель кровотока в одном сосуде

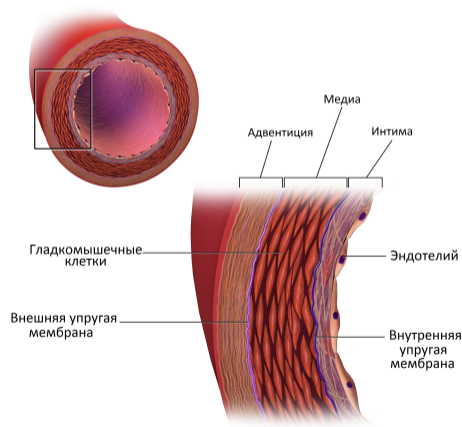
$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{V})}{\partial x} = \mathbf{G}(t, x, \mathbf{V}), \quad \mathbf{V} = \begin{pmatrix} S \\ u \end{pmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{pmatrix} Su \\ \frac{u^2}{2} + \frac{P(t, S)}{\rho} \end{pmatrix}$$

$S(t, x)$  — поперечное сечение,

$u(t, x) = \frac{1}{S} \int_{\Gamma_S} v_x d\mathbf{s}$  — линейная скорость,

$P(S)$  — давление,  $\rho$  — плотность крови,

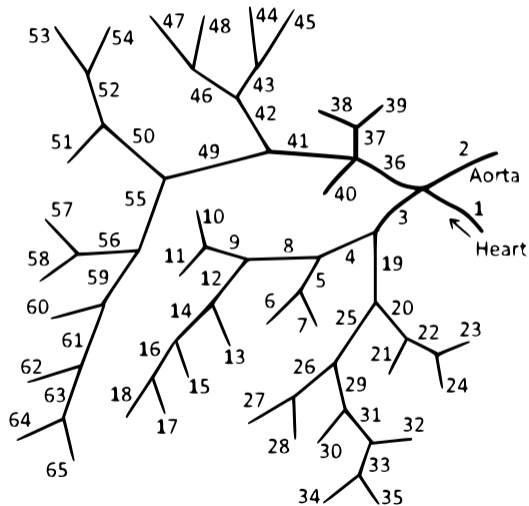
# Упругость материала стенки



$$P(S) = P^{ext}(t, x) + \rho c_0^2 f(S)$$

$$f(S) = \begin{cases} e^{S/S_0 - 1} - 1, & S > S_0 \\ \ln(S/S_0), & S \leq S_0 \end{cases}$$

# Граничные условия



## Граничные условия

1

$$\sum_{k=k_1, k_2, \dots, k_M} \varepsilon_k S_k(t, \tilde{x}_k) u_k(t, \tilde{x}_k) = 0,$$

2

$$p_k(S_k(t, \tilde{x}_k)) + \frac{\rho u^2(t, \tilde{x}_k)}{2} = p_{k+1}(S_{k+1}(t, \tilde{x}_{k+1})) + \frac{\rho u^2(t, \tilde{x}_{k+1})}{2}$$

3

Сердечный выброс (CO)

$$Q_H(t) = u(t, 0) S(t, 0)$$

4

Терминальные концы

$$p_k(A_k(t, \tilde{x}_k)) - p_{veins} = R_k(t) S_k(t, \tilde{x}_k) u_k(t, \tilde{x}_k).$$



# Идентификация параметров / Персонализация

- ① Сегментация данных МРТ/КТ и построение анатомической структуры
- ② Кривая сердечного выброса
  - Вариабельность ЧСС
- ③ Артериальное давление
- ④ Терминальное сопротивление
  - Артерио-венозный градиент
  - Распределение потоков
- ⑤ Жёсткость материала стенок сосудов
  - Возраст (с возрастом повышается)
  - Заболевания (гипертония, диабет ...)
  - Силь жизни (спорт, интенсивность употребления табака, алкоголя)

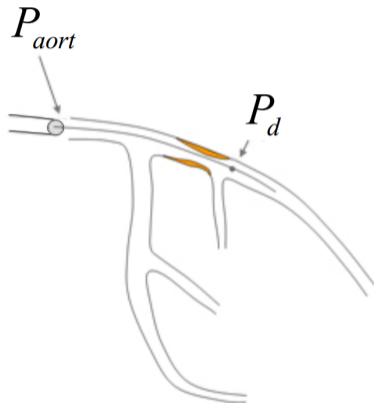
## Выброс из левого желудочка и терминальные сопротивления

$$Q_H(t, \tau) = \begin{cases} SV \frac{\pi}{2\tau} \sin\left(\frac{\pi t}{\tau}\right), & 0 \leq t \leq \tau \\ 0, & \tau < t \leq T \end{cases} \quad \tau = 0.3[s] - \frac{0.03[ms^2]}{T[s]}$$

$$R_k(t) = \begin{cases} R_k \left(1 + 2 \sin\left(\frac{\pi t}{\tau}\right)\right), & 0 \leq t \leq \tau, \\ R_k, & \tau < t \leq T \end{cases}$$

$$SV = 112[ml] - \frac{HR[bpm]}{2[bpm/ml]}, \quad 40 \text{ bpm} < HR < 160 \text{ bpm}$$

## Гемодинамические индексы



$$FFR = \frac{P_d}{P_{aort}}$$

$FFR=1 \rightarrow$  **Норма**

$FFR < 0.75 \rightarrow$  **Установка стента**

$$FFR = \frac{P_{dist}^{hyp}}{P_{ao}^{hyp}} \quad CFR = \frac{Q_{hyp}}{Q_{res}} \quad iFR = \frac{P_{dist}^w}{P_{ao}^w}$$

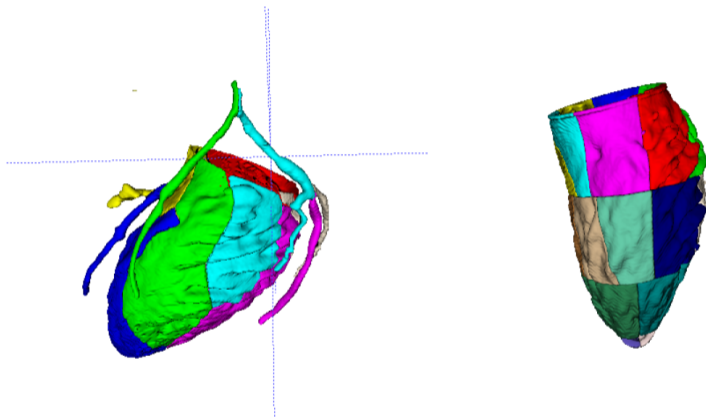
## Фракционный резерв кровотока (ФРК, FFR)

### Недостатки прямых измерений

- Внутрисосудистое инвазивное измерение, вазодилатация
- Дорогостоящий, одноразовый датчик давления
- Сложность интерпретации при многососудистом поражении

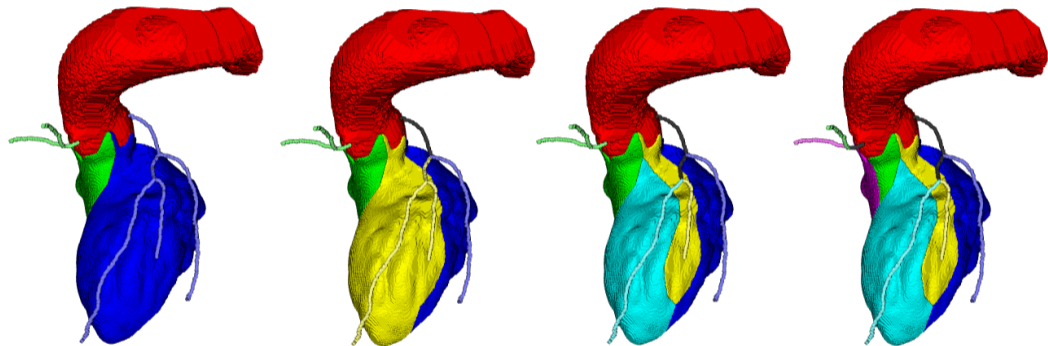
Решение: Вычислительная оценка ФРК с помощью персонализированной модели использующей неинвазивно собираемые данные (КТ, артериальное давление, ЧСС, ...)

# Персонализированные и стандартные зоны перфузии<sup>1</sup>



<sup>1</sup>Simakov S., Gamilov T., Danilov A., Rebrova A., Kopylov Ph. Personalized computational estimation of relative change in coronary blood flow after percutaneous coronary intervention in short-term and long-term perspectives, RJNAMM, 2022, 37(5), 279-291

## Персонализированные и стандартные зоны перфузии<sup>2</sup>

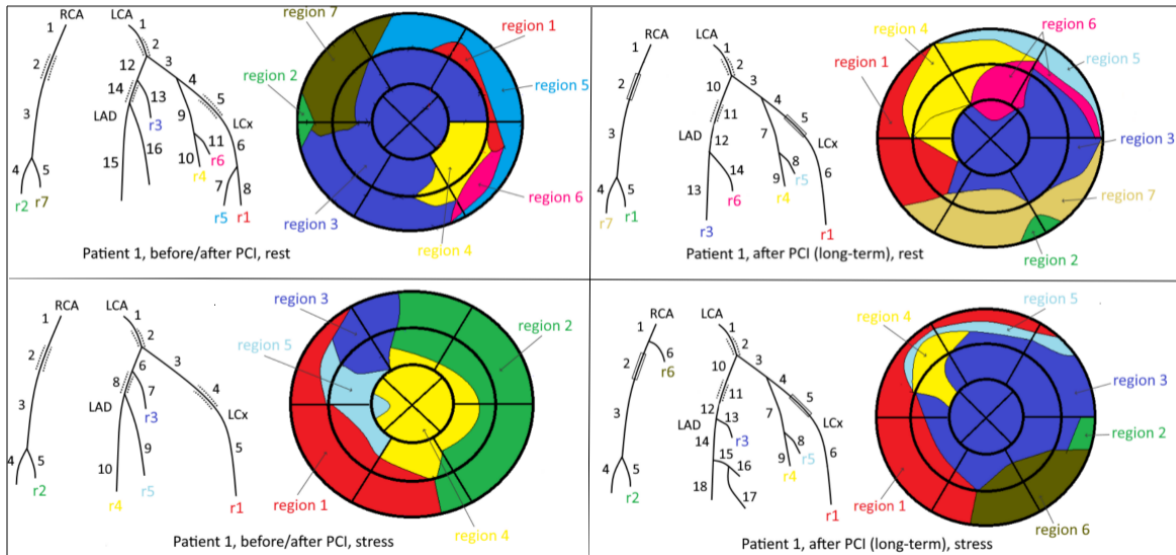


<sup>2</sup>Danilov A., Gamilov T., Liang F., Rebrova A., Chomakhidze P., Kopylov Ph., Simakov S. Myocardial perfusion segmentation and partitioning methods in personalized models of coronary blood flow, RJNAMM, 2023, 38(5), 293-302

## КТ-перфузия миокарда

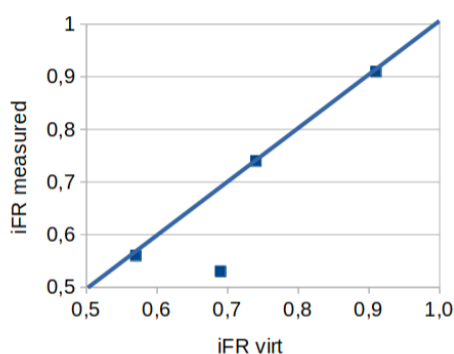
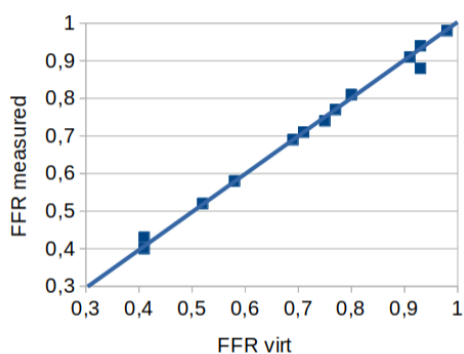
$$TPR = \frac{AD_{endocard}}{AD_{epicard}}$$

$$\alpha = \begin{cases} 1, & TPR \geq 1 \\ \exp a (1 - TPR), & TPR < 1 \end{cases}$$



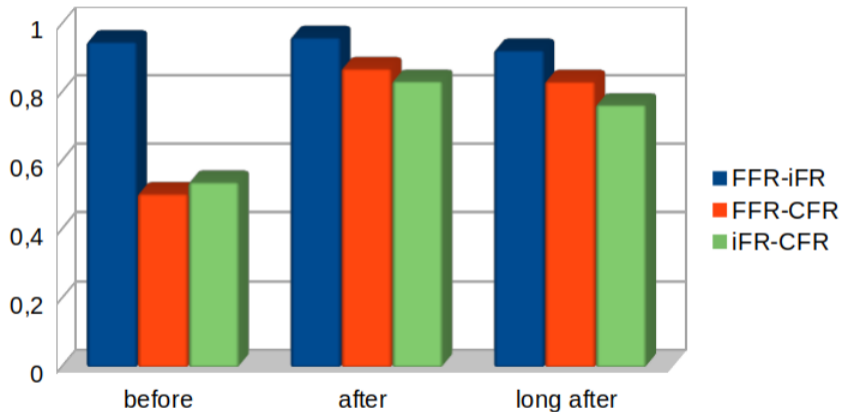


## Валидация

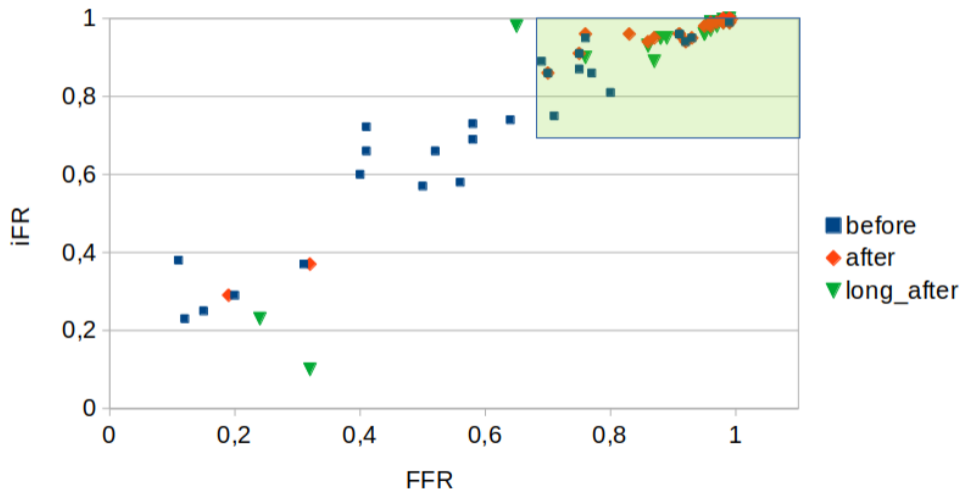


	FFR ( $N = 13$ )	iFR ( $N = 4$ )
$\delta_{max}$	5.7%	30.2%
$\delta_{average}$	1.3%	8%

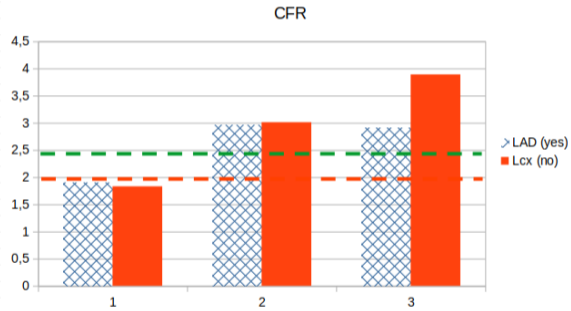
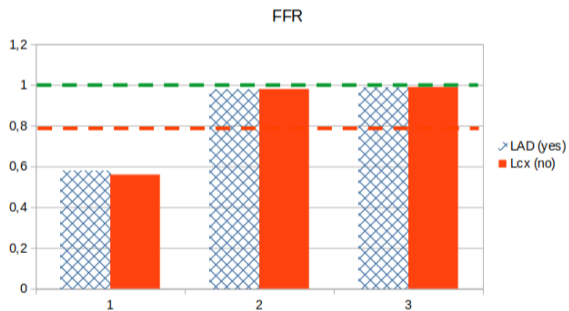
## Корреляция FFR, CFR и iFR



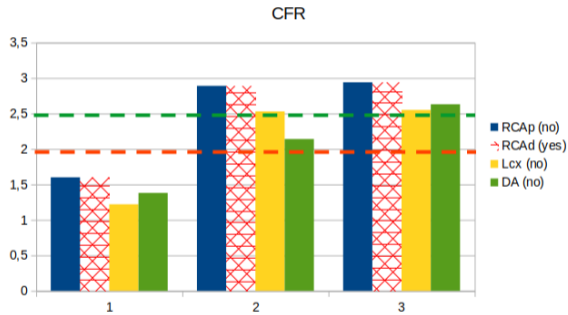
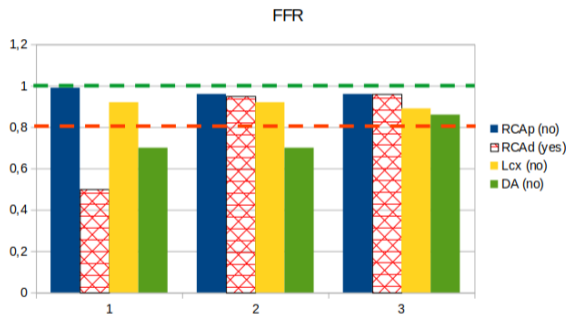
## Корреляция FFR и iFR

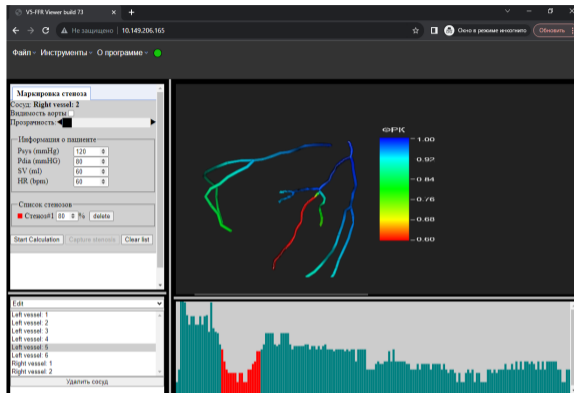
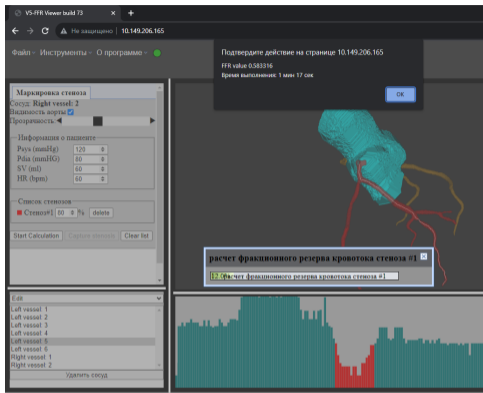


# Результаты расчетов: Пациент №3



# Результаты расчетов: Пациент №4





Программа для расчет фракционного резерва кровотока с помощью одномерной сетевой модели (RU 2019665779): Клинические испытания <sup>3</sup>.

<sup>3</sup>Yu. Vassilevski, T. Gamilov, A. Danilov, G. Kopytov, S. Simakov, A Web-Based Non-invasive Estimation of Fractional Flow Reserve (FFR): Models, Algorithms, and Application in Diagnostics. Trends in Biomathematics: Modeling Epidemiological, Neuronal, and Social Dynamics, 2023

Спасибо за внимание!



Работа выполнена при поддержке РФФ № 21-41-00029