

Валидация синтетической базы данных пульсовых волн с помощью машинного обучения

Тимур Гамилов¹⁻³

¹ Первый МГМУ им. И. М. Сеченова

² Московский физико-технический институт

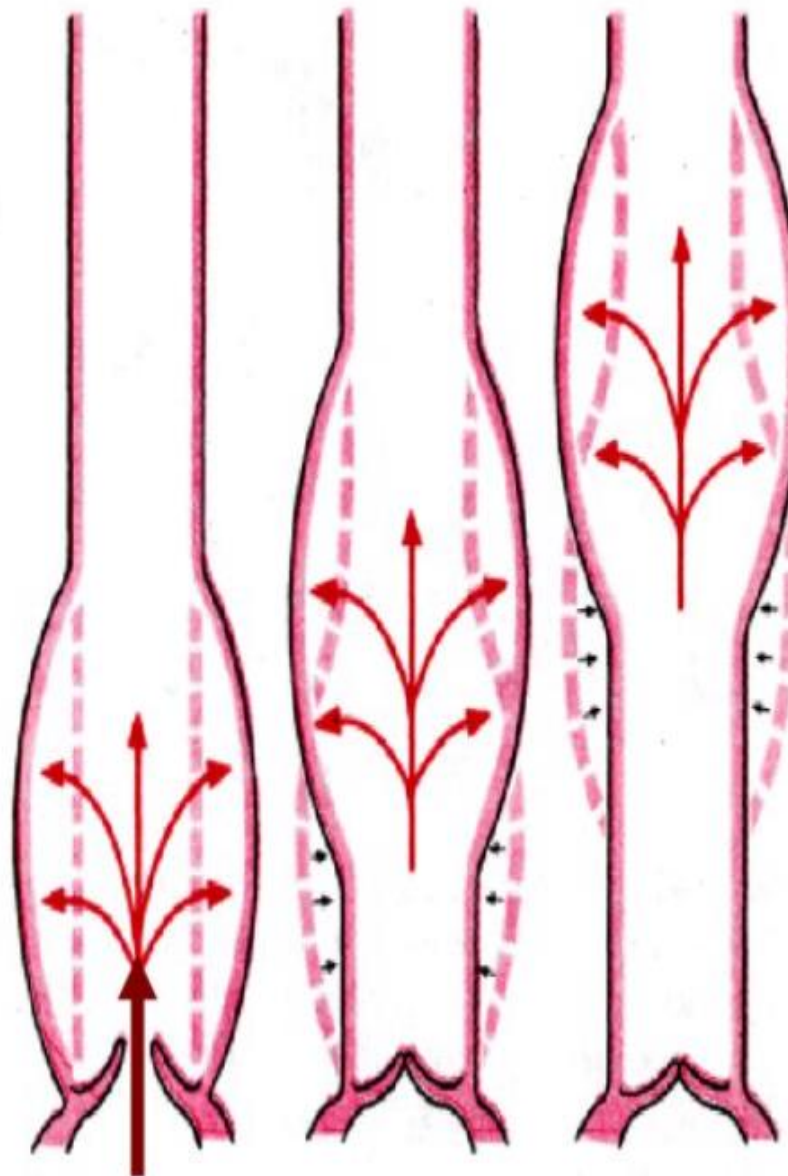
³ Институт Вычислительной Математики РАН



Зачем нужна скорость пульсовой волны?

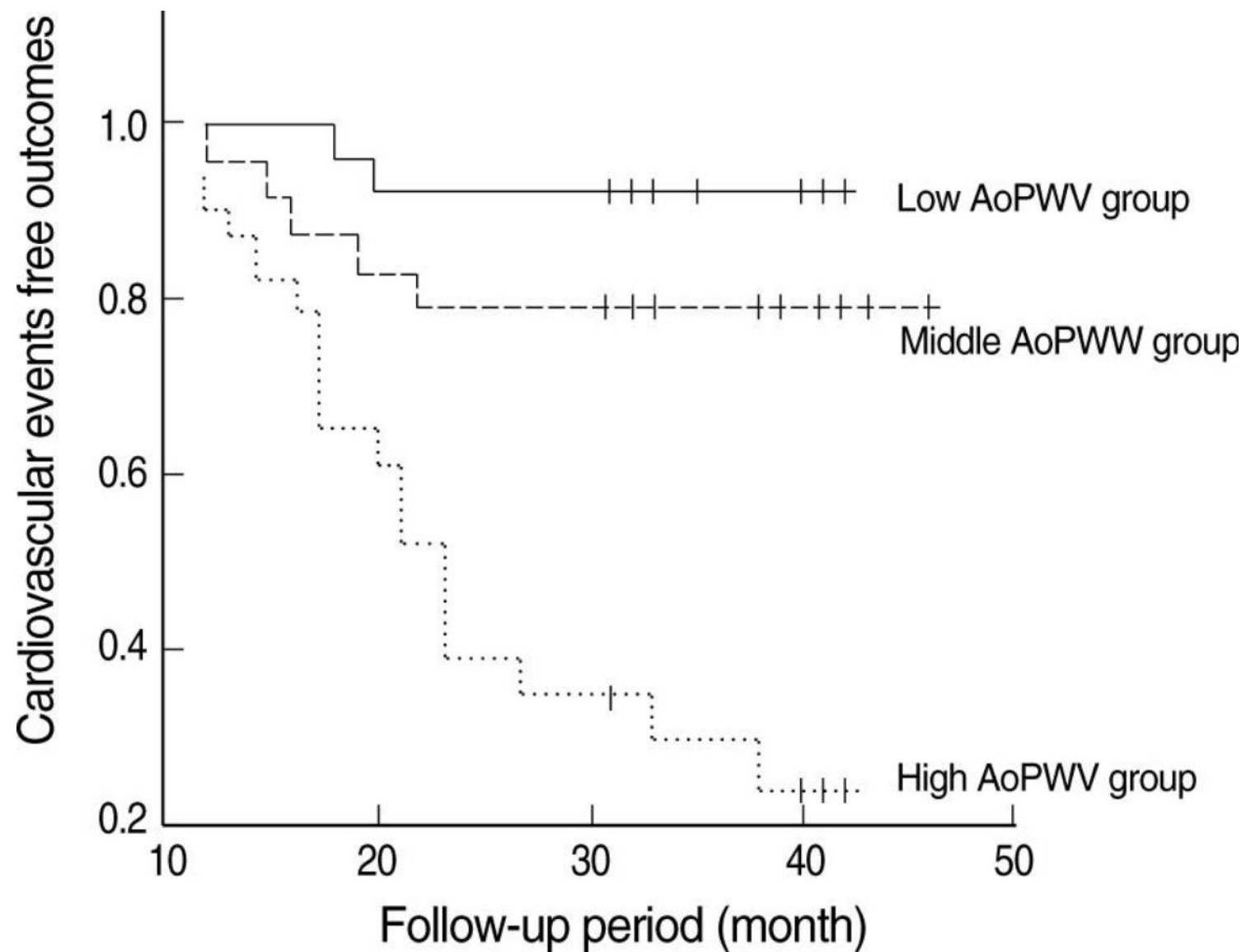


- Важный диагностический параметр
- Для идентификации других моделей





Скорость пульсовой волны в аорте

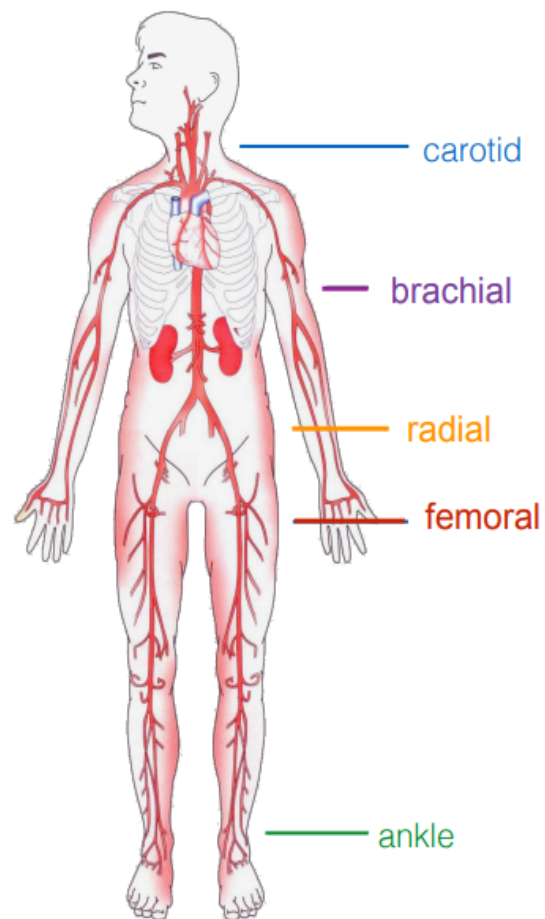




Скорость пульсовой волны в аорте

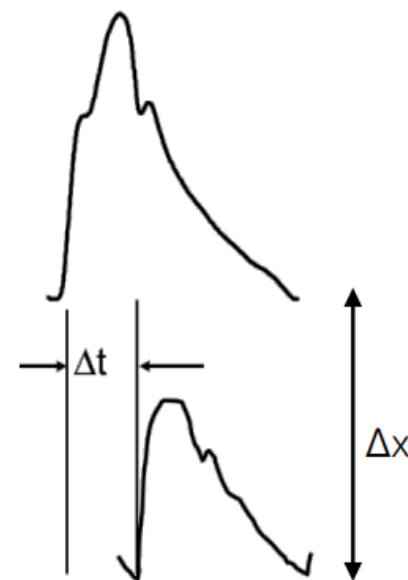


$$ePWV = 9.587 - 0.402 \times \text{age} + 4.560 \times 10^{-3} \times \text{age}^2 - 2.621 \times 10^{-5} \times \text{age}^2 \times \text{MBP} + 3.176 \times 10^{-3} \times \text{age} \times \text{MBP} - 1.832 \times 10^{-2} \times \text{MBP}$$

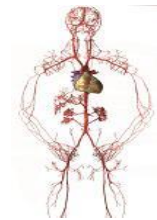


carotid-femoral PWV
brachial-ankle PWV
carotid-radial PWV
femoral-ankle PWV

foot-to-foot method



$$PWV_{ff} = \Delta x / \Delta t$$

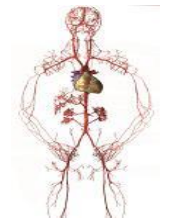


Синтетическая база данных пациентов

- Разработка и тестирование алгоритмов анализа пульсовых волн требует обширные базы данных



- Сбор информации для этих баз данных – это долго и дорого
- Альтернатива – генерирование синтетических баз данных



Основные уравнения

ЗСМ

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial(AU)}{\partial x} = 0,$$

$$P = P_0 + \frac{\beta}{A_0}(\sqrt{A} - \sqrt{A_0}) + \frac{\Gamma}{A_0 \sqrt{A}} \frac{\partial A}{\partial t}$$

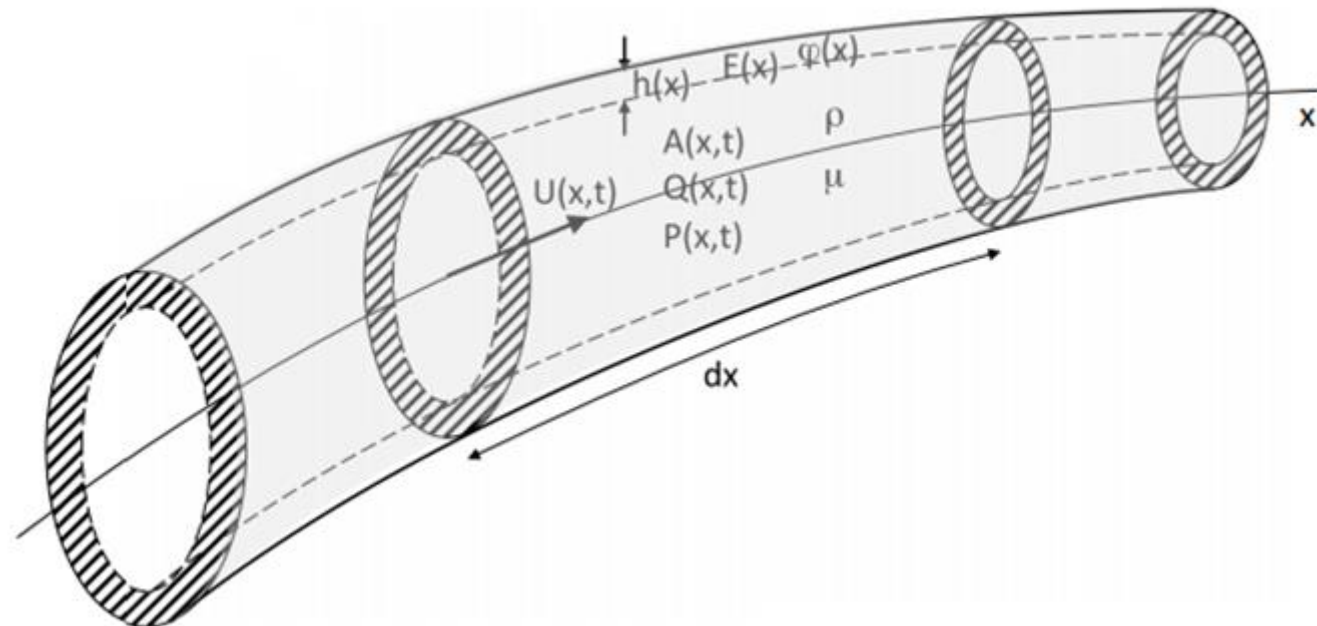
ЗСИ

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{f}{\rho A},$$

$$\beta(x) = \frac{4}{3} \sqrt{\pi} E h$$

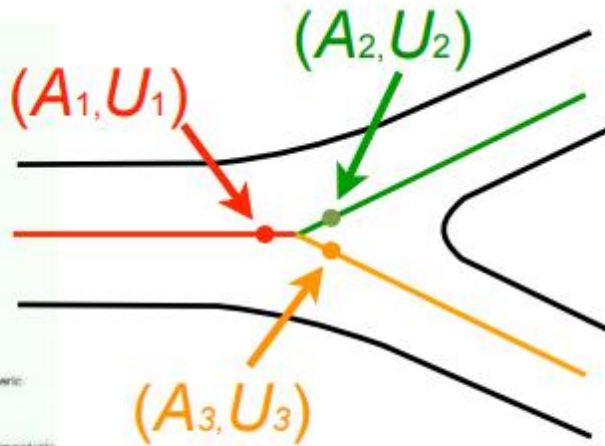
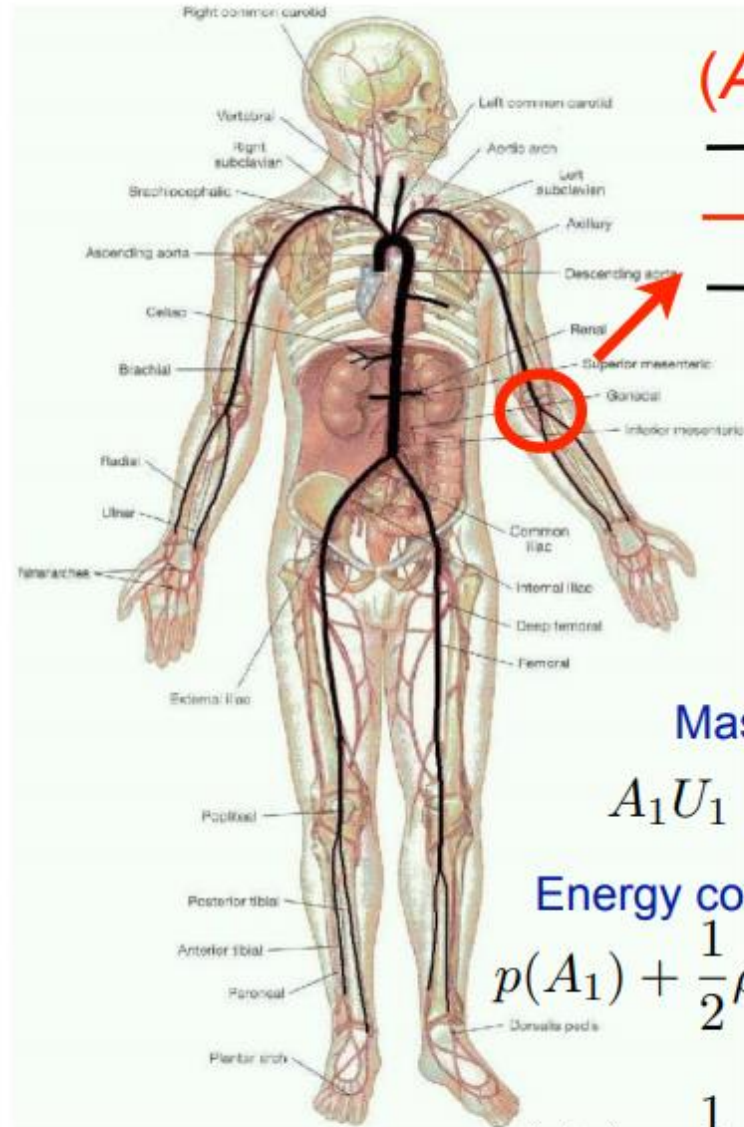
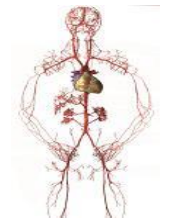
$$\Gamma(x) = \frac{2 \sqrt{\pi} \varphi h}{3 A_0^{3/2}}.$$

$$c_0 = \sqrt{\frac{\beta}{2\rho} A_0^{-1/4}} = \sqrt{\frac{2 E h}{3 \rho R_0}}$$





Области бифуркаций



KING'S
College
LONDON

Mass conservation

$$A_1 U_1 = A_2 U_2 + A_3 U_3$$

Energy conservation (Bernoulli)

$$p(A_1) + \frac{1}{2} \rho U_1^2 = p(A_2) + \frac{1}{2} \rho U_2^2$$

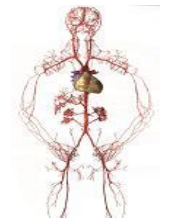
$$p(A_1) + \frac{1}{2} \rho U_1^2 = p(A_3) + \frac{1}{2} \rho U_3^2$$

Propagation of characteristic variables

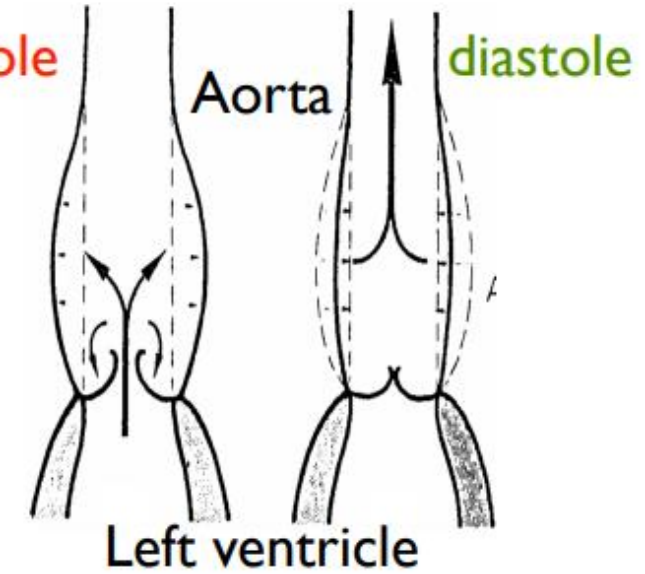
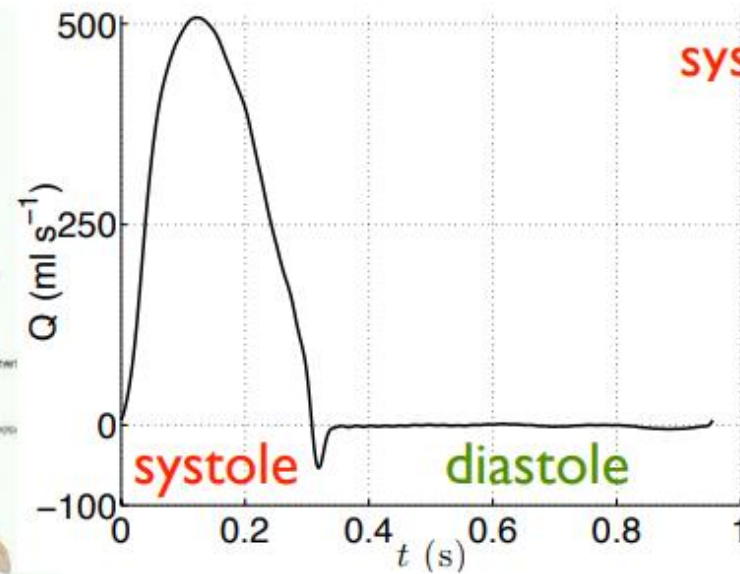
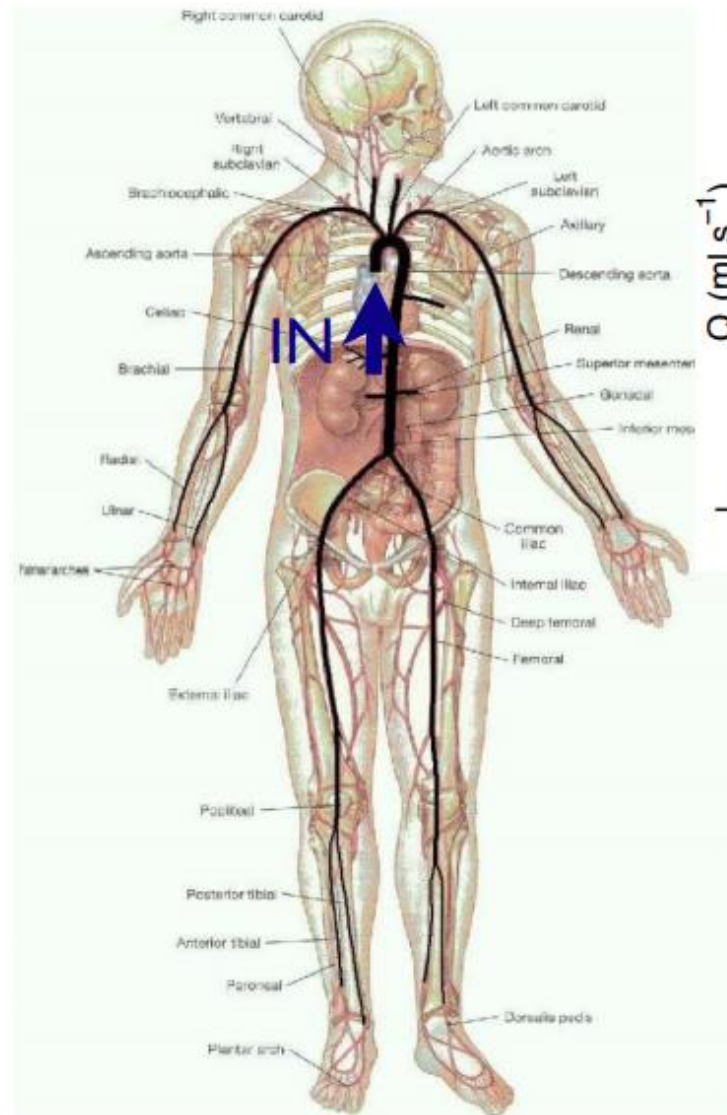
$$W_f(A_1, U_1)_t = W_f(A_1, U_1)_{t+\Delta t}$$

$$W_b(A_2, U_2)_t = W_b(A_2, U_2)_{t+\Delta t}$$

$$W_b(A_3, U_3)_t = W_b(A_3, U_3)_{t+\Delta t}$$

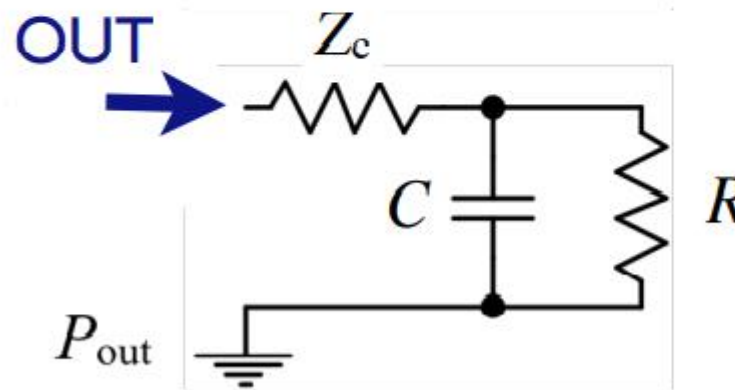
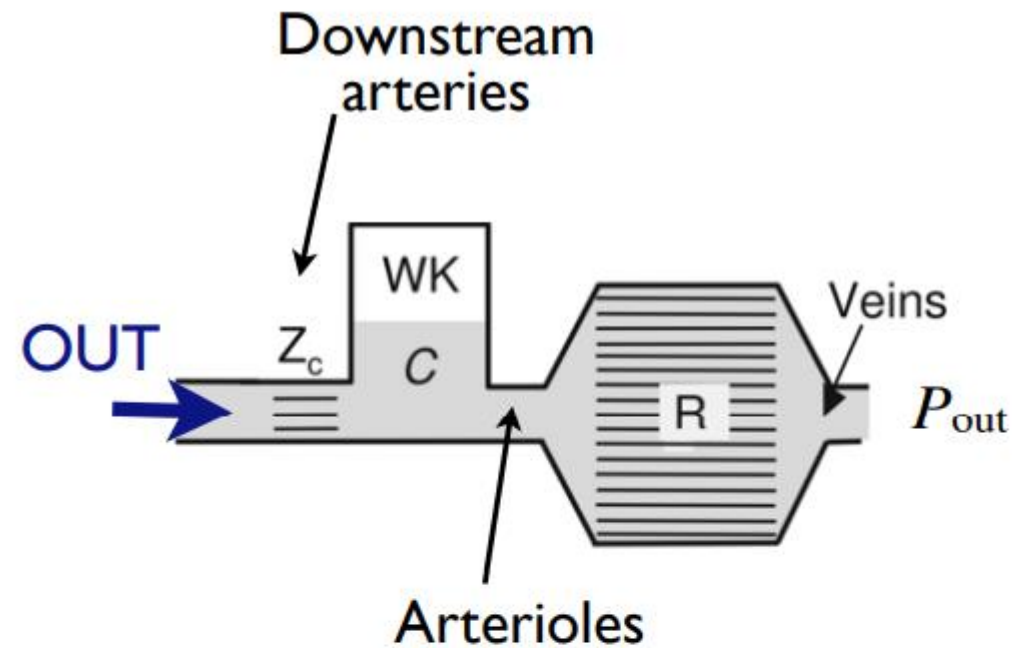
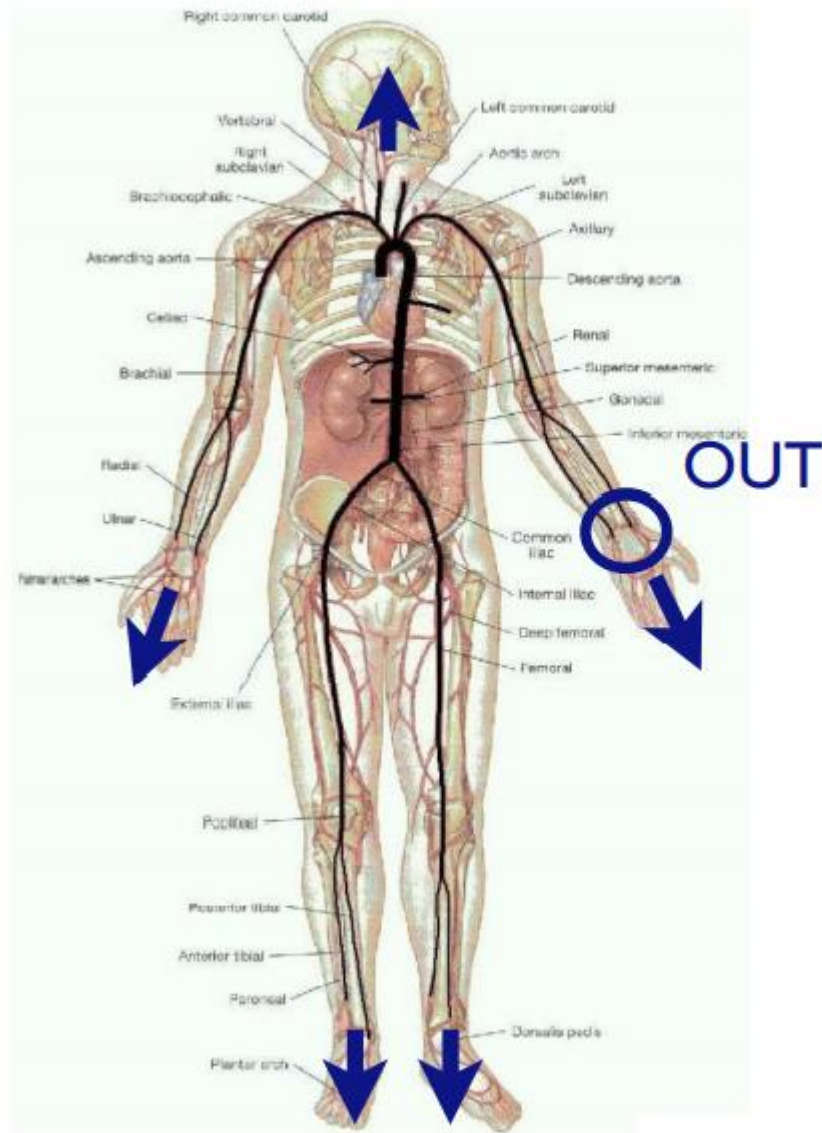
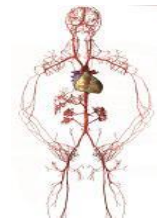


Граничное условие на входе



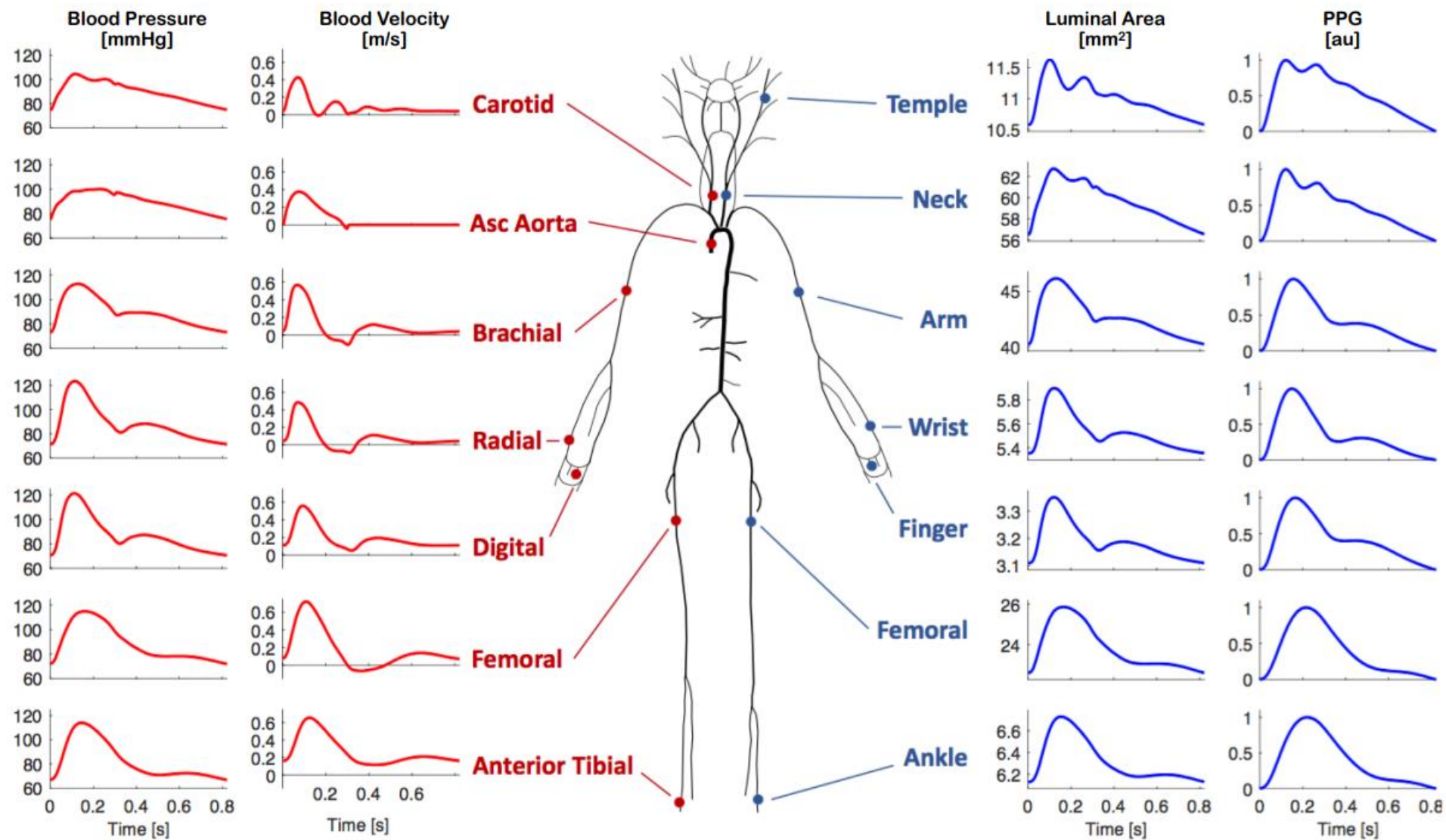
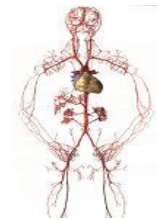


Граничное условие на выходе



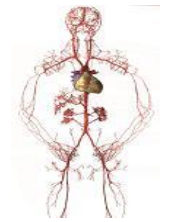


Базовая модель





Литературный обзор: параметры, меняющиеся с возрастом



Changed with age

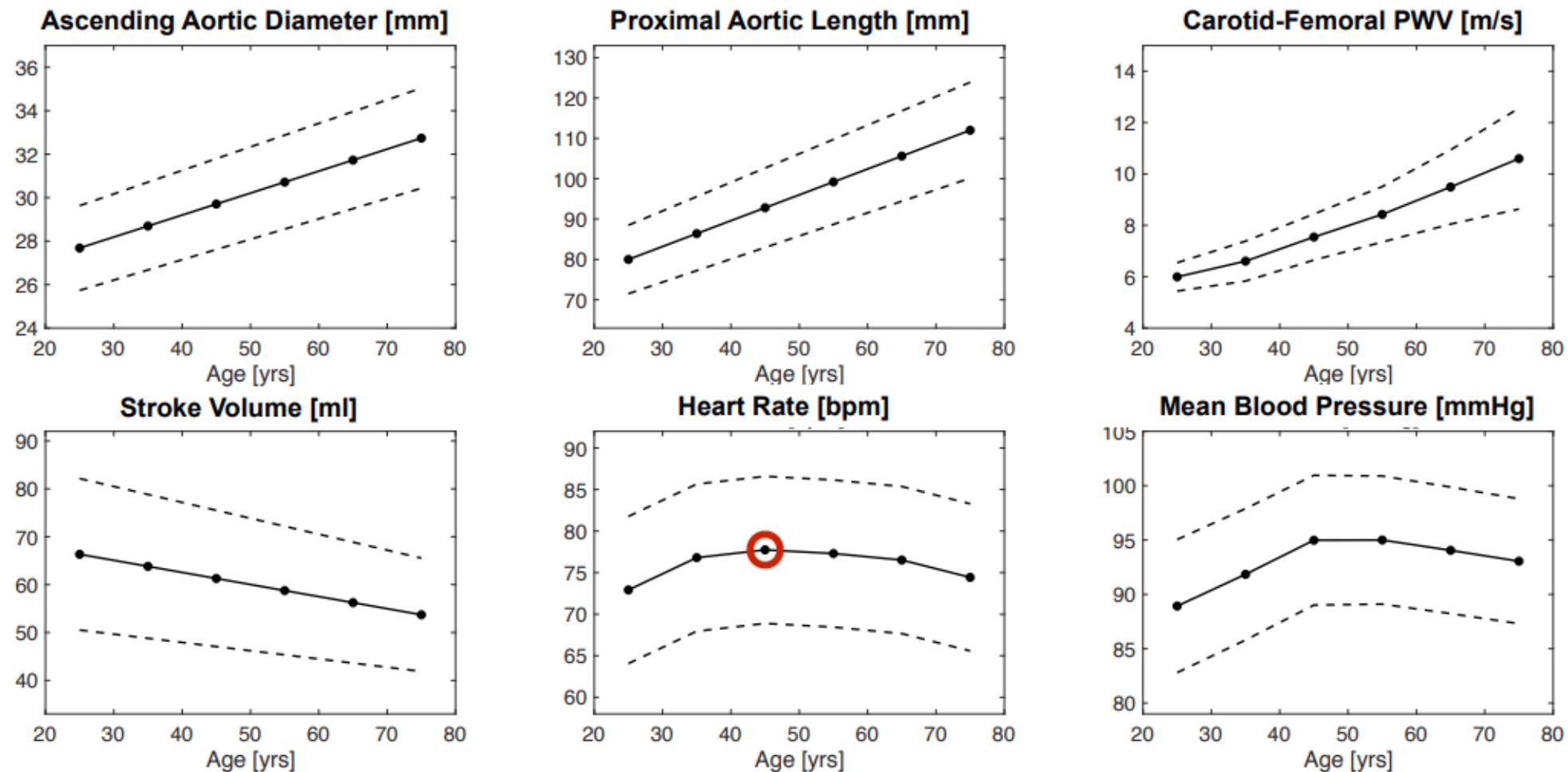
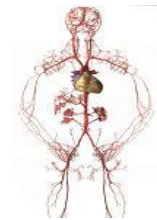
- ↑ Luminal diameter of larger arteries (24)
- ↑ Length of proximal aorta (4)
- ↑ Pulse wave velocity (25)
- ↓ Stroke volume (10)
- ↪ Heart rate (21)
- ↪ Mean blood pressure

No change with age

- Luminal diameter of remaining arteries (4)
- Length of remaining arteries (3)
- Left ventricular ejection time (9)
- Time to peak aortic flow (3)
- Aortic reverse flow volume (1)



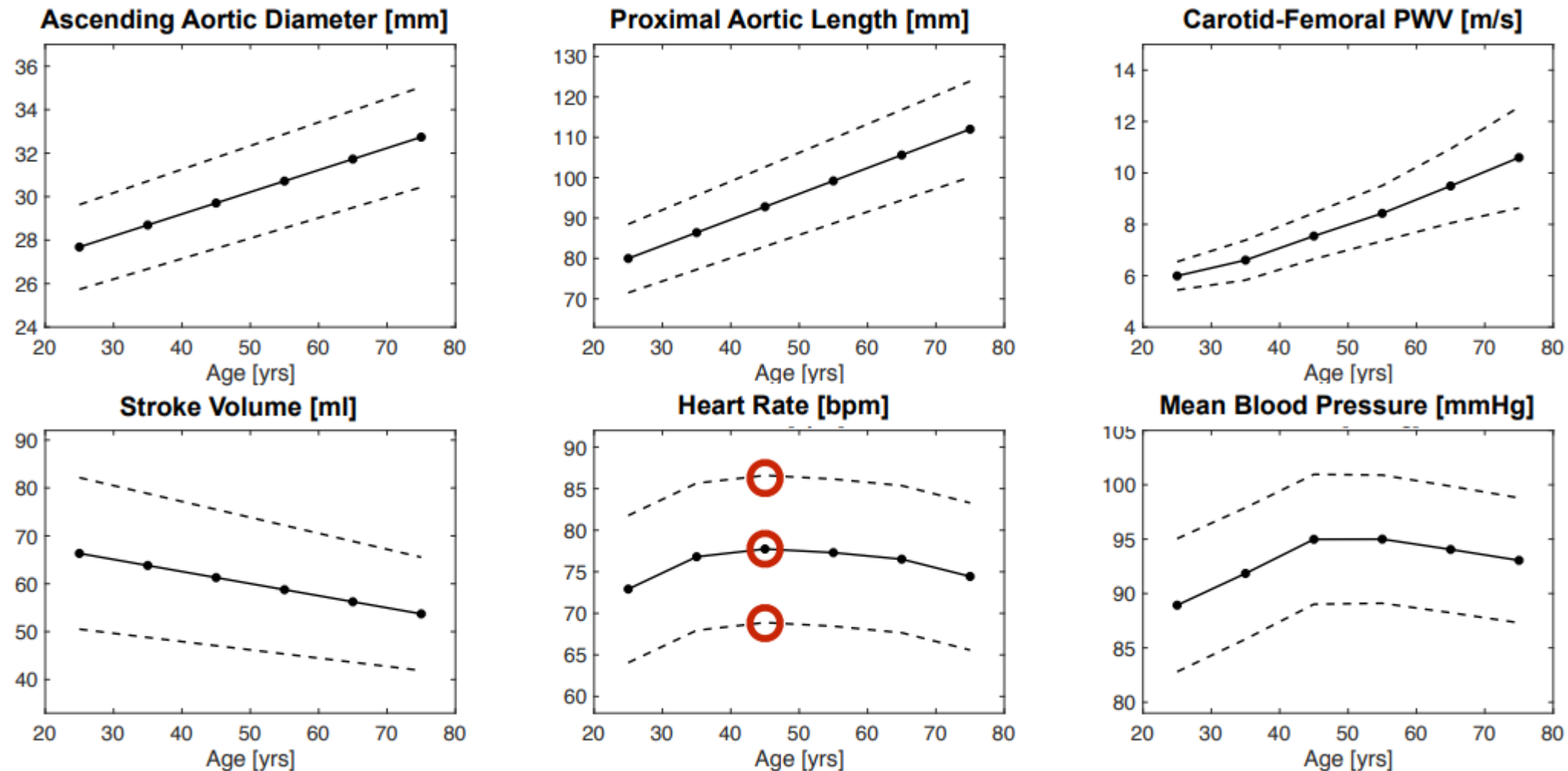
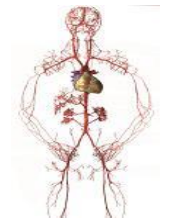
Базовая модель для возрастной группы



- базовая модель для возрастной группы использует средние значения параметров

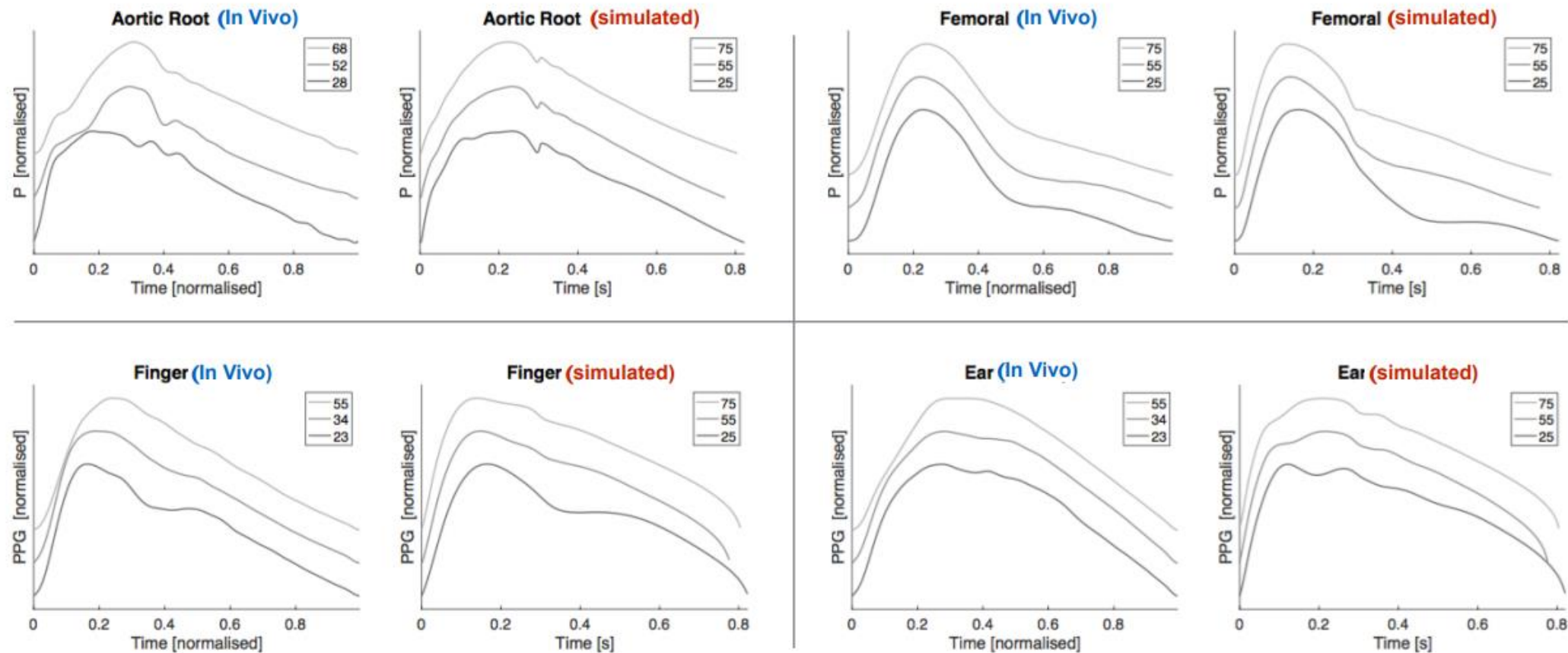
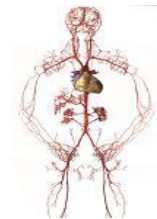


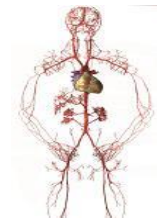
Набор из 729 моделей для каждой возрастной группы





Пульсовые волны для различных возрастных групп



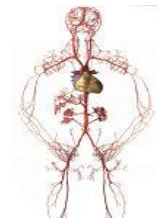


Использование синтетической базы данных

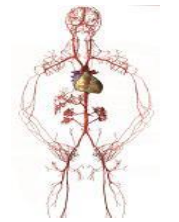
1. Оценка PWV с помощью МО
2. Подбор параметров для моделей кровотока



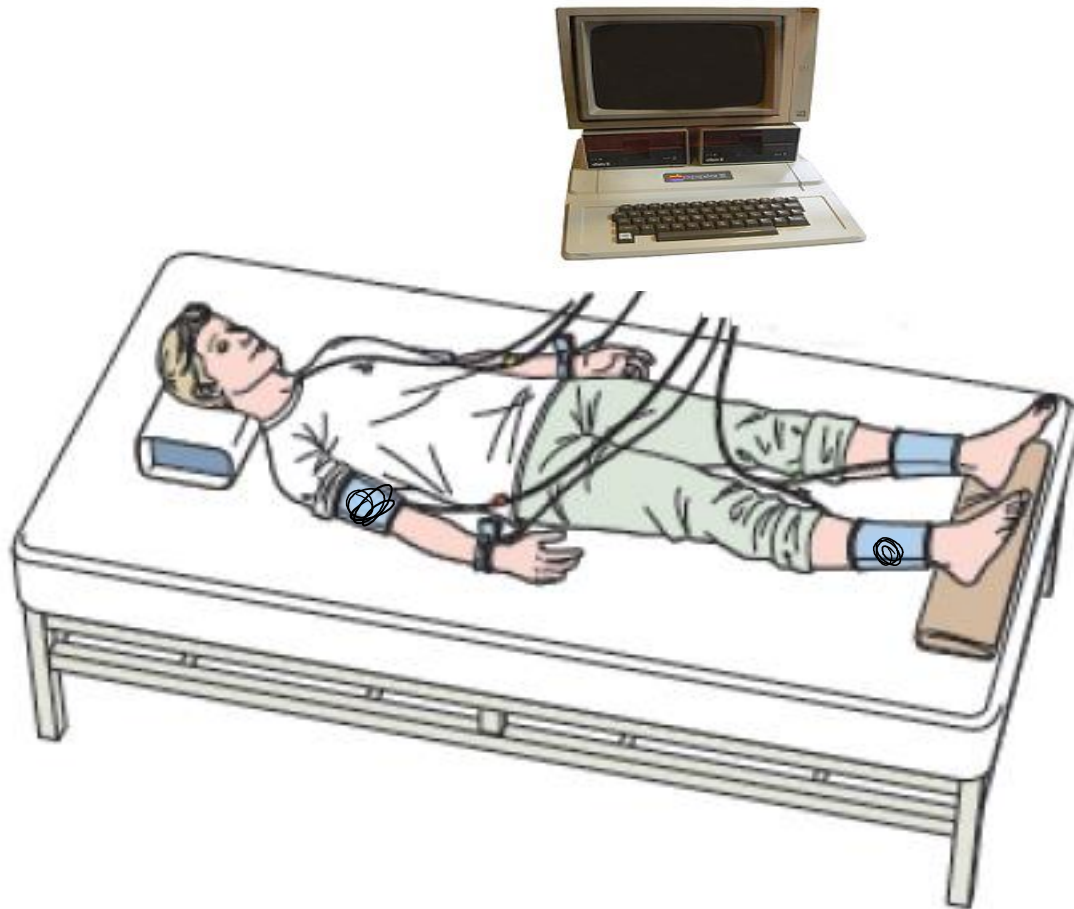
Машинное обучение



- Обучение на синтетических данных (4374)
- Валидация на реальных данных (128)
- Входные данные: возраст, ЧСС, УО, давления, LVET
- Выходной параметр: PWV плечо-лодыжка



Измерения на пациентах



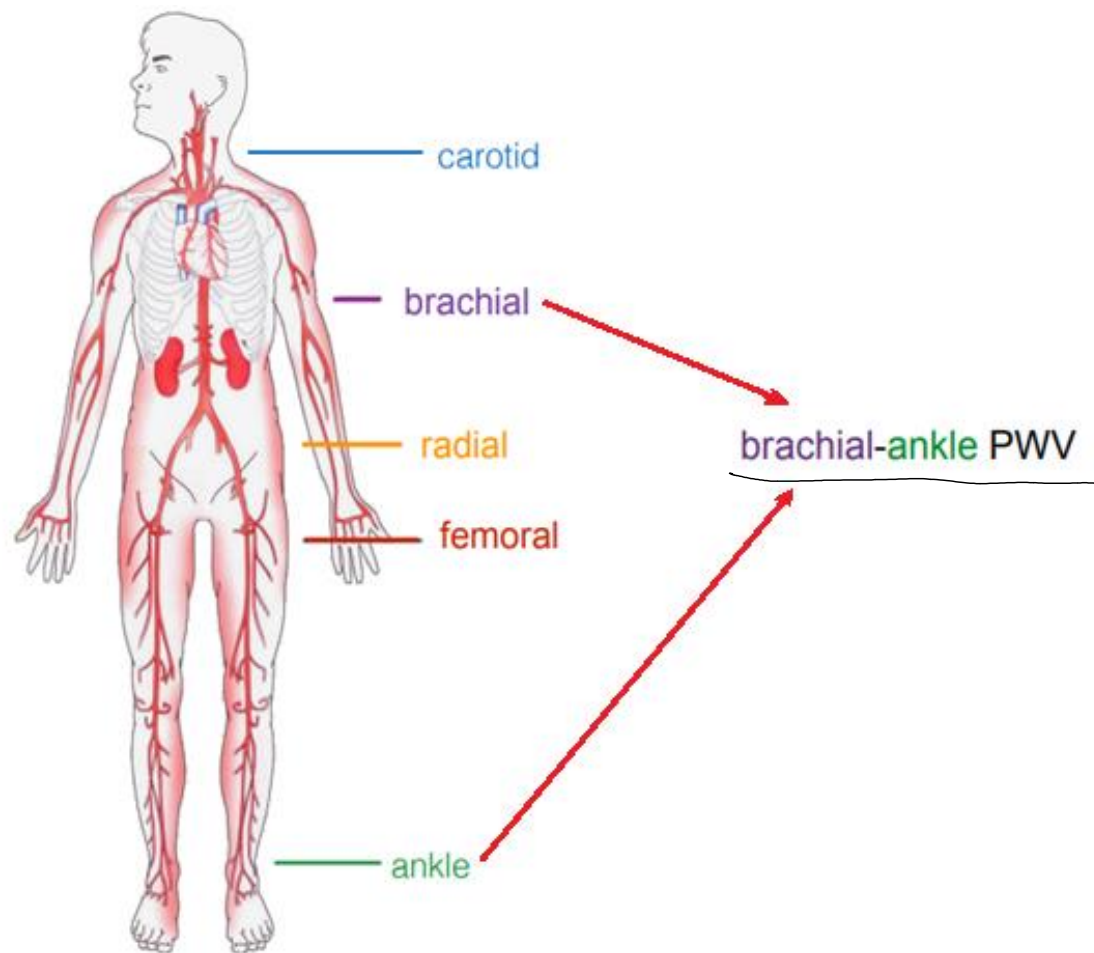
~100 пациентов

возраст
ЧСС
Ударный объём
SBP (плеч.)
MBP (плеч.)
DBP (плеч.)
....

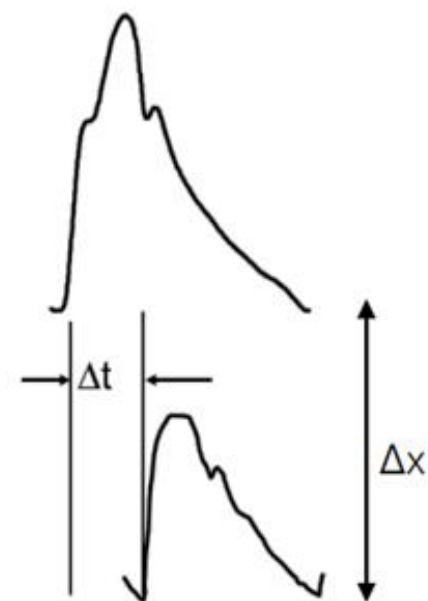
*Сеченовский Университет
Университетская клиническая больница №1*



Скорость пульсовой волны



foot-to-foot method

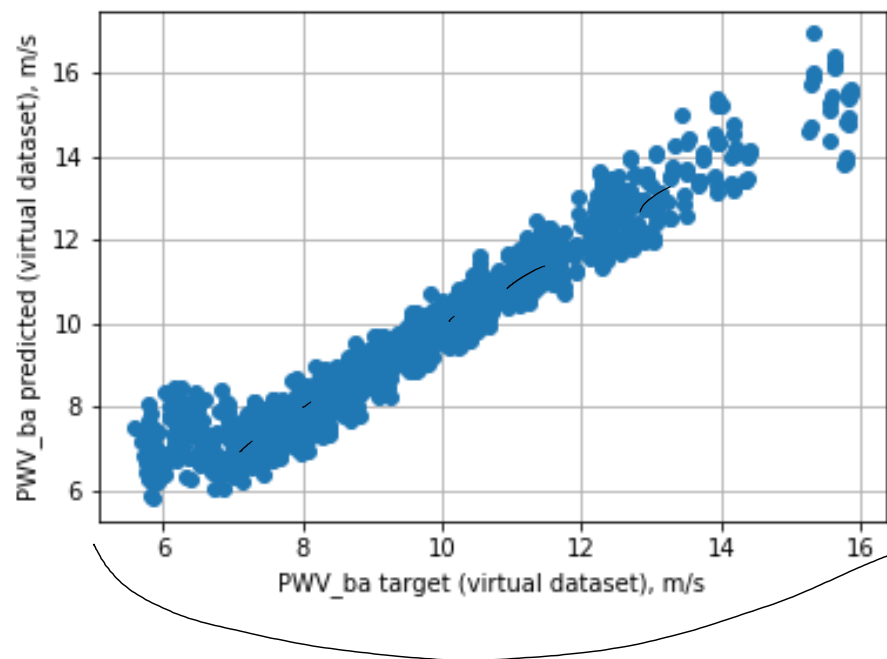


$$PWV_{ff} = \Delta x / \Delta t$$

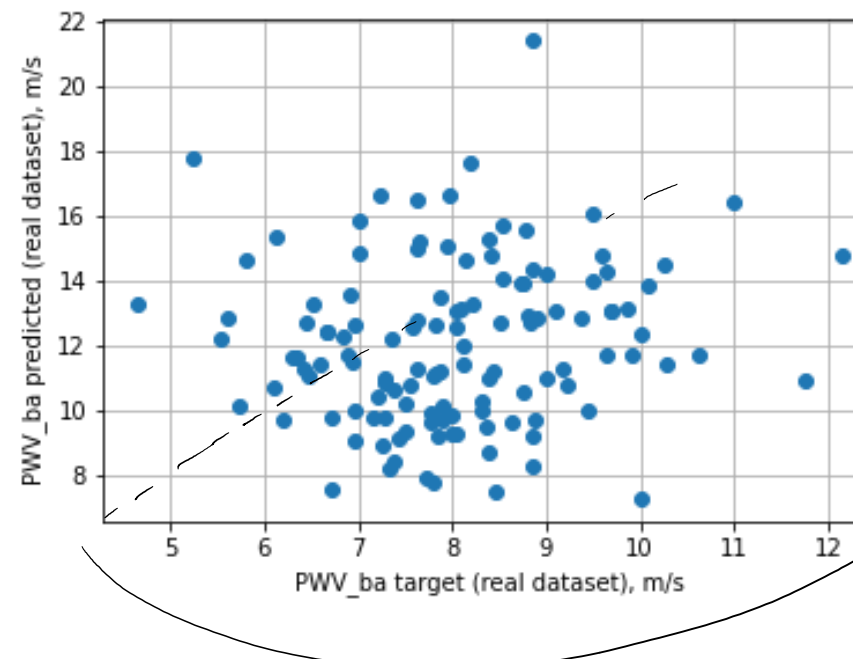


Линейная регрессия

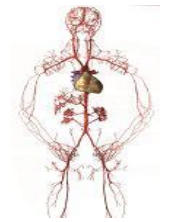
Синтетические данные



Реальные данные

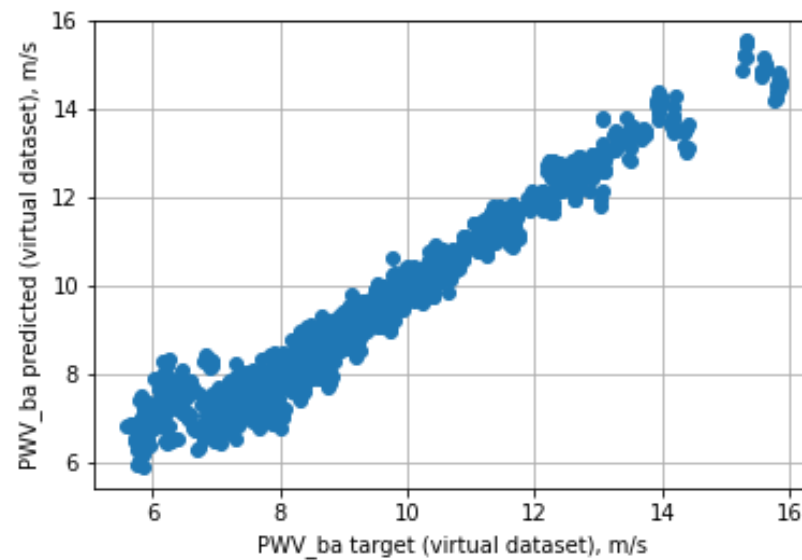


Максимальное отклонение от искомой величины: 240%
Среднее отклонение от искомой величины: 55%

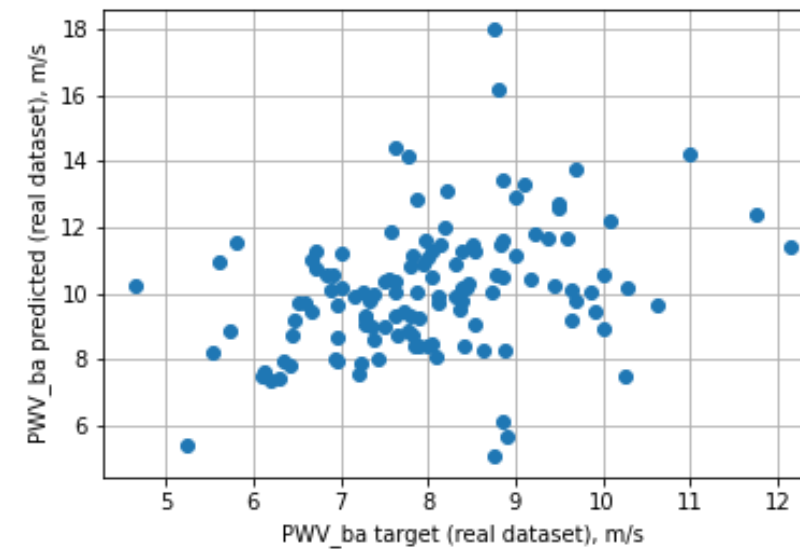


Метод опорных векторов

Синтетические данные



Реальные данные

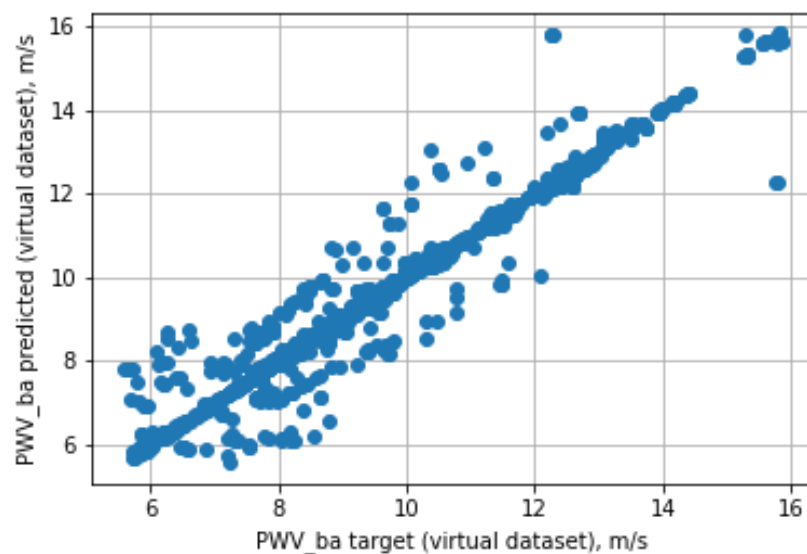


Максимальное отклонение от искомой величины: 120%
Среднее отклонение от искомой величины: 31%

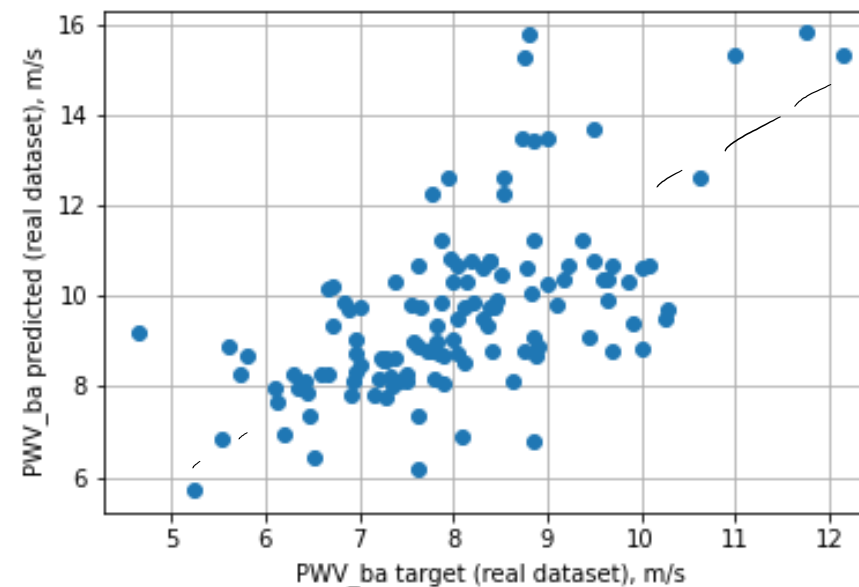


Дерево решений

Синтетические данные



Реальные данные

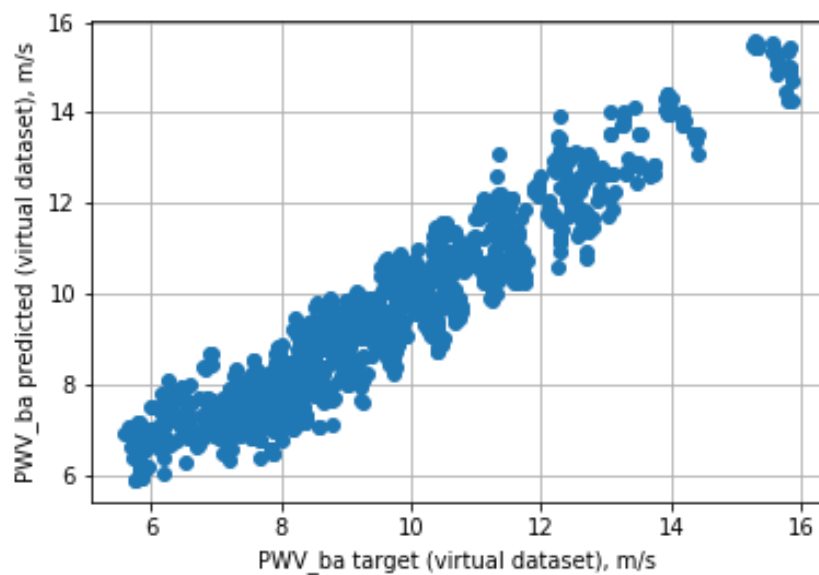


Максимальное отклонение от искомой величины: 98%
Среднее отклонение от искомой величины: 23%

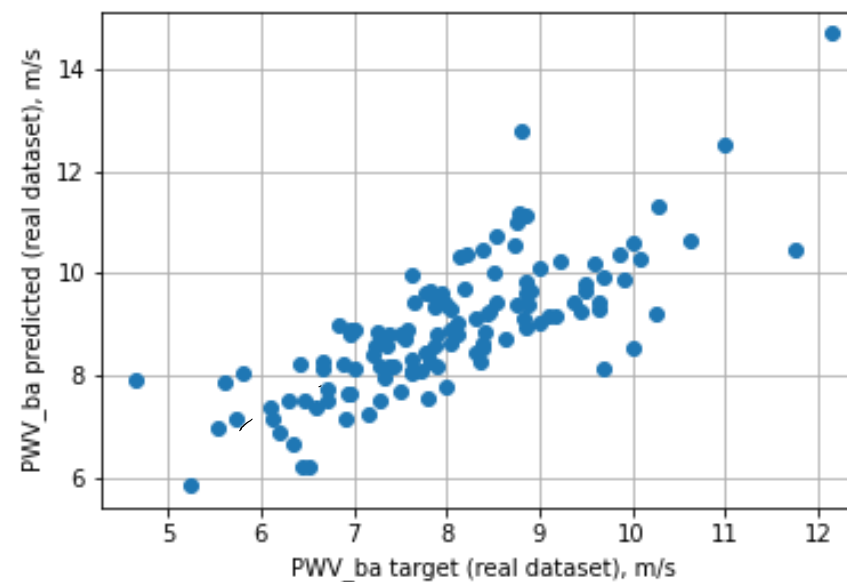


“k” ближайших соседей

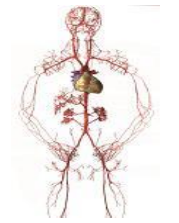
Синтетические данные



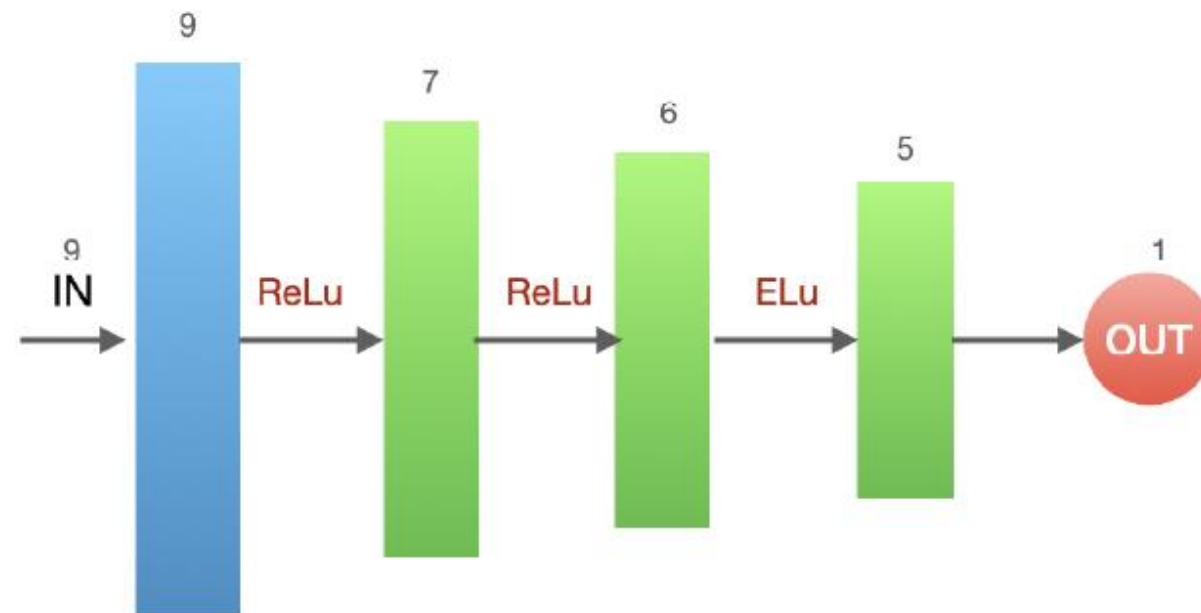
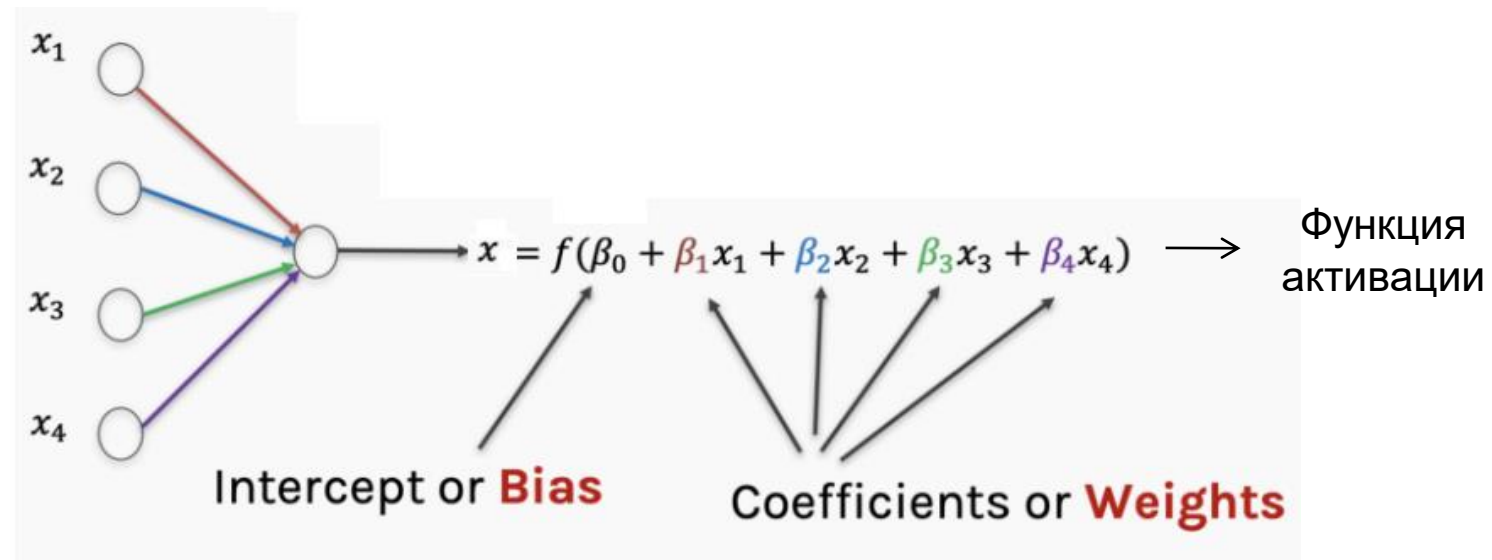
Реальные данные

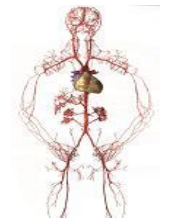


Максимальное отклонение от искомой величины: 70%
Среднее отклонение от искомой величины: 17%



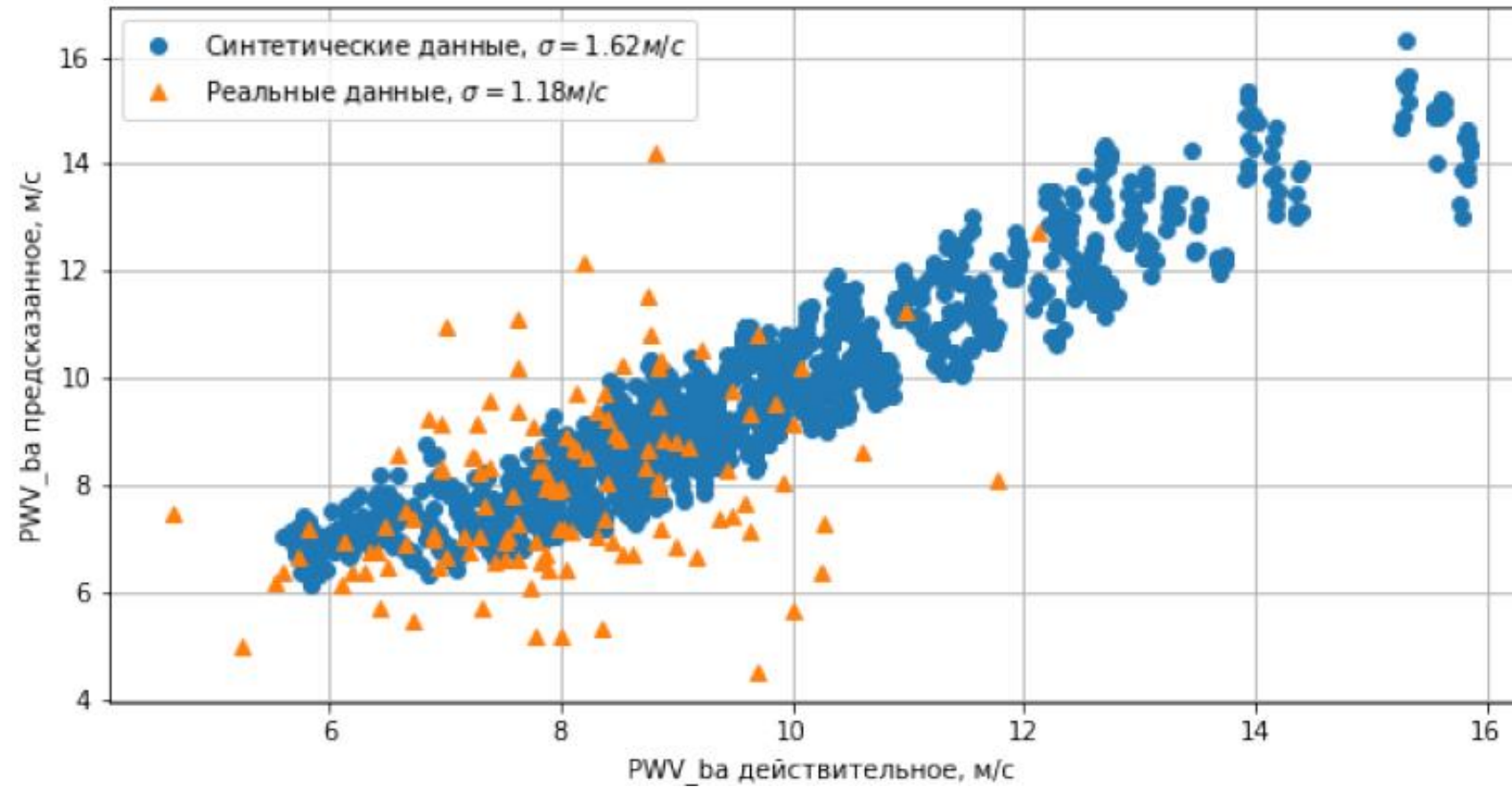
Нейронная сеть





Нейронная сеть

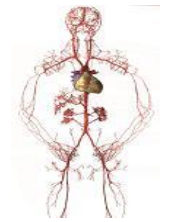
PWV, м/с
предсказанная



PWV действительная, м/с



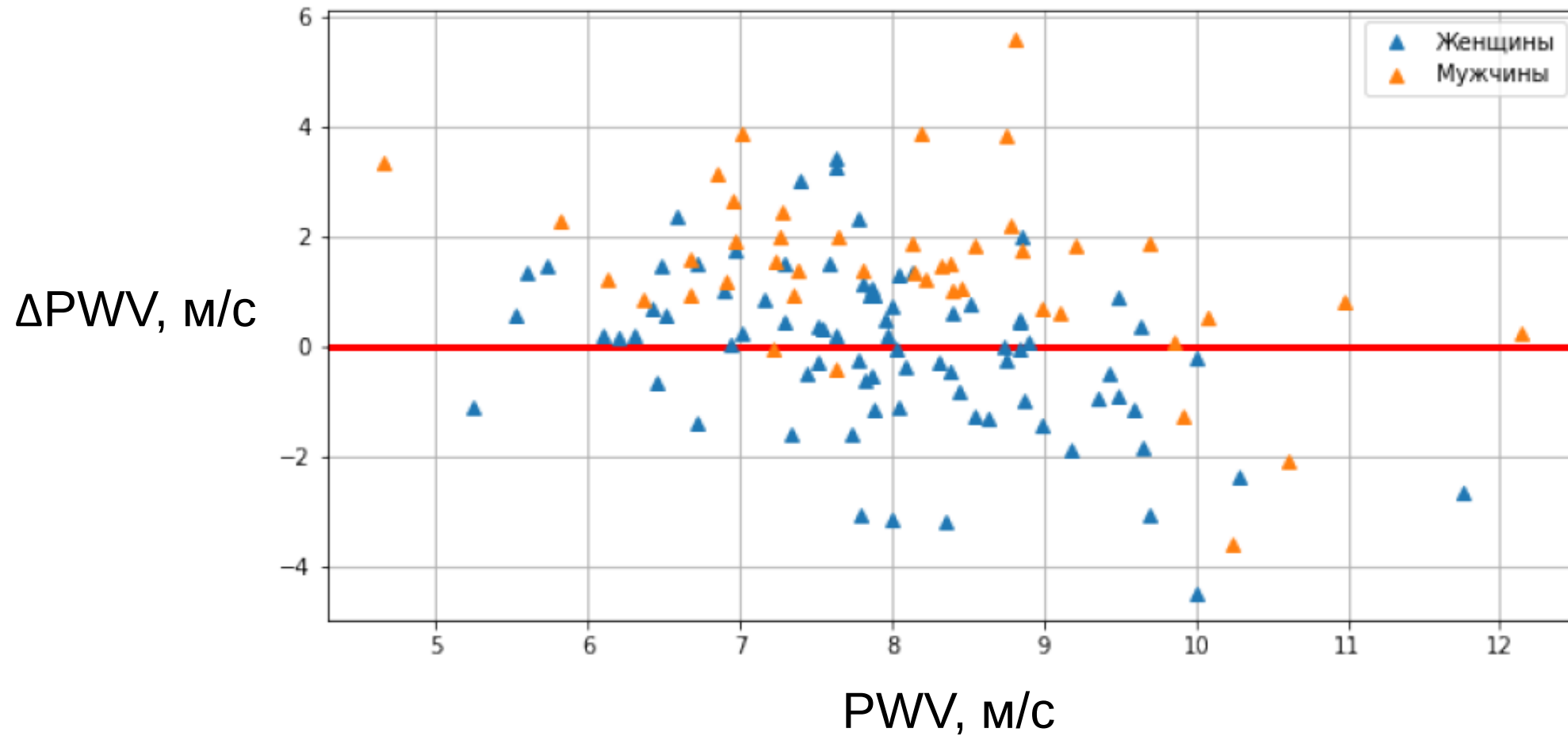
Отклонения



Метод	Среднеквадратичное отклонение, м/с	Среднее отклонение
Линейная регрессия	2.93	54%
Метод опорных векторов	2.32	34%
Дерево решений	2.12	39%
Метод k -ближайших соседей	1.77	17%
Гребневая регрессия	1.62	16%
Нейронная сеть	1.18	15%



Мужчины и женщины



Среднее отклонение: М 14%, Ж 22%



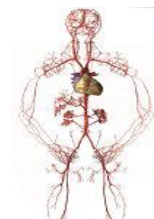
Митральная недостаточность



- У 10-ти (из 128) пациентов с самым высоким ΔPWV наблюдается высокая степень митральной недостаточности
- Митральная недостаточность коррелирует с высокой PWV

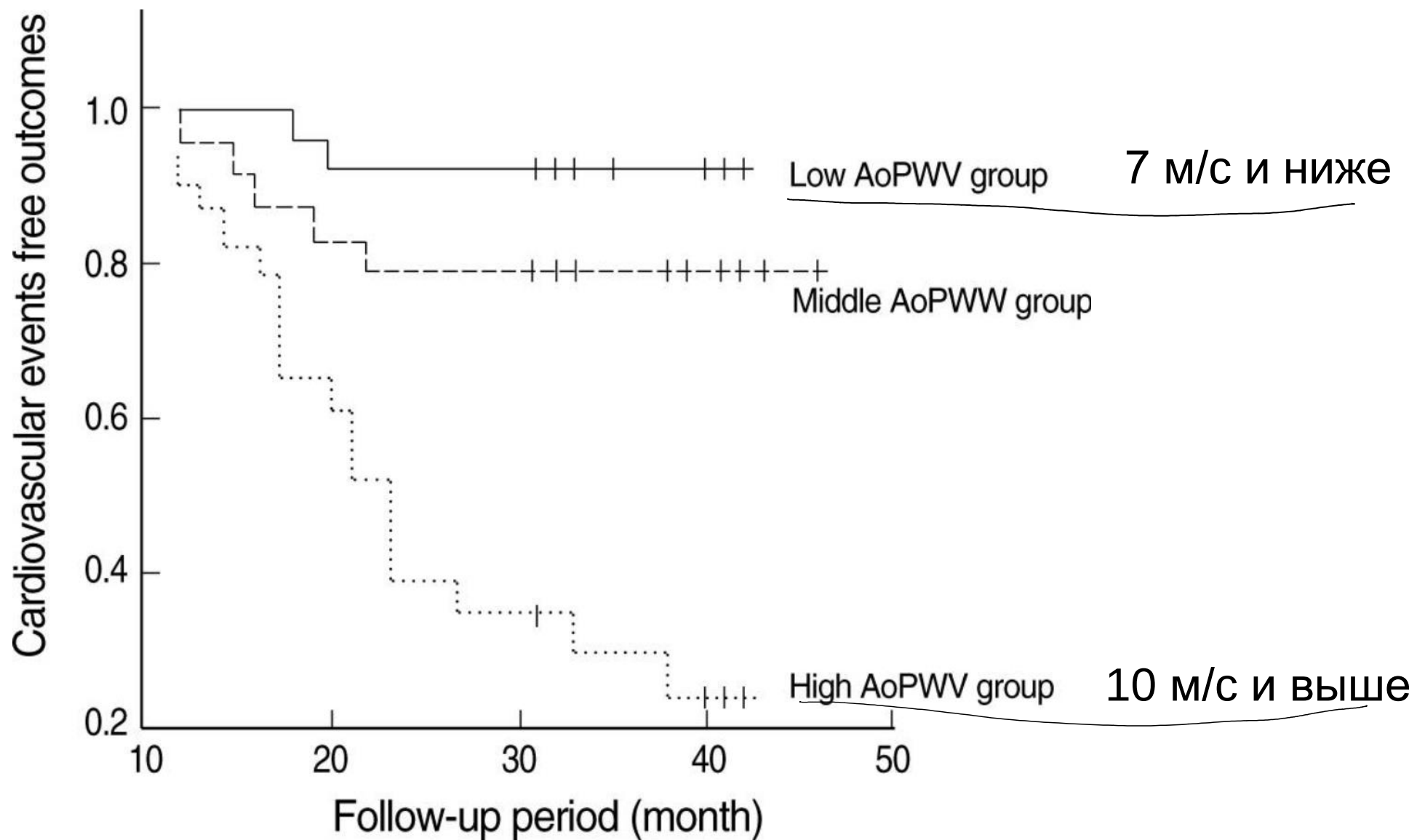


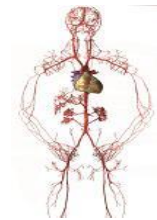
База данных	Реальная	Синтетическая
Количество пациентов	125	4374
Возраст	58 ± 15 лет	50 ± 17 лет
ЧСС	68 ± 12 уд/мин	76 ± 9 уд/мин
Ударный объем	54.63 ± 19.55 мл/м2	60.35 ± 12.34 мл/м2
Систолическое давление в плече	103.99 ± 17.13 мм рт.ст.	119.08 ± 11.37 мм рт.ст
Диастолическое давление в плече	86.68 ± 12.15 мм рт.ст	72.55 ± 7.23 мм рт.ст
Систолическое давление в лодыжке	107.59 ± 15.95 мм рт.ст	110.09 ± 12.47 мм рт.ст
Диастолическое давление в лодыжке	81.38 ± 12.89 мм рт.ст	75.09 ± 7.29 мм рт.ст
Среднее артериальное давление в плече	92.45 ± 12.89 мм рт.ст	93.79 ± 6.75 мм рт.ст
Среднее артериальное давление в лодыжке	90.12 ± 13.27 мм рт.ст	94 ± 6.7 мм рт.ст
Скорость пульсовой волны	8.02 ± 1.3 м/с	9.44 ± 2.06 м/с
Количество женщин	45	-
Количество мужчин	80	-
Количество курящих пациентов	26	-
Количество пациентов с кардиологическими патологиями	25	-
Количество пациентов с нарушением ритма и проводимости сердца	6	-
Количество пациентов с атеросклерозом	3	-
n Количество пациентов с диастолической дисфункцией	5	-
Количество пациентов с ишемической болезнью сердца	32	-
Количество пациентов с гипертонической болезнью	83	-





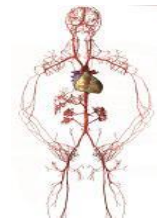
Скорость пульсовой волны в аорте





- Машинное обучение на реальных данных
- Оптимизация методов машинного обучения
- Скорость пульсовой волны в аорте - ?

gamilov@cres.mipt.ru



Спасибо!

gamilov@cres.mipt.ru