



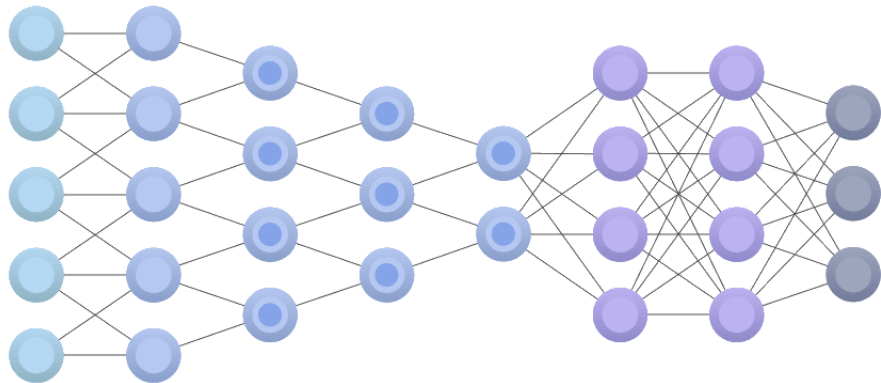
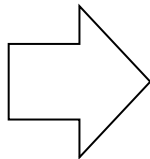
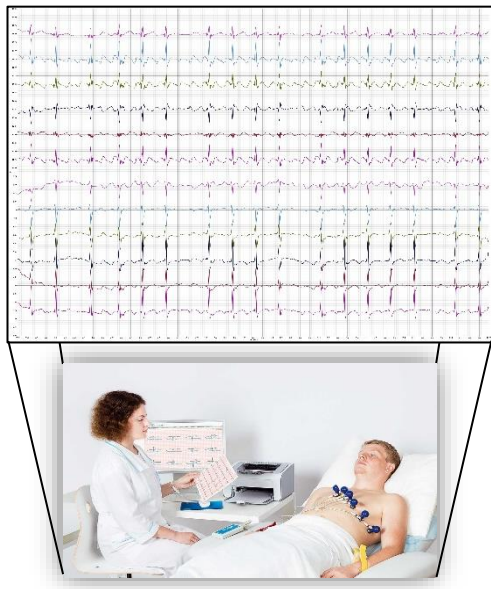
УНИВЕРСИТЕТ ЛОБАЧЕВСКОГО

ИНСТИТУТ ИНФОРМАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ, МАТЕМАТИКИ И МЕХАНИКИ

Оптимизация значений гиперпараметров нейросетевой модели классификации и сегментации сигналов ЭКГ

Карчков Денис Александрович, Д.А. Ануфриев, Е.Н. Варсеева, А.С. Зайцев, Е.Г. Голдинова,
К.С. Егоров, М.А. Усова, И.Г. Лебедев, К.А. Баркалов

Актуальность и постановка проблемы



Задача оптимизации гиперпараметров относится к классу задач глобальной оптимизации с ограничениями. Целевая функция, как правило, является многоэкстремальной, не имеет аналитического описания и представляет собой «чёрный ящик».

Цель и задачи работы

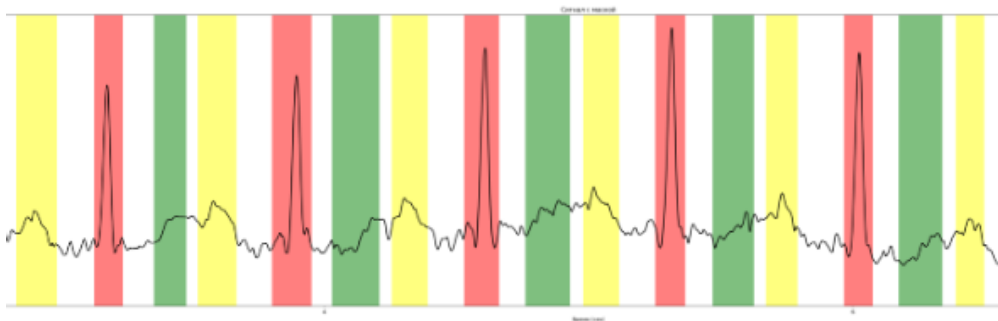
Цель работы: повысить качество классификации и сегментации сигналов ЭКГ за счет оптимизации гиперпараметров используемых моделей.

Задачи:

- ❑ Разработать архитектуры MobileNetV3 Small для классификации и U-Net 1D для сегментации, адаптированные под ЭКГ.
- ❑ Сформировать обучающие и тестовые выборки на основе открытого датасета LUDB.
- ❑ Реализовать параллельные – синхронную и асинхронную – схемы глобального поиска в системе Globalizer.
- ❑ Сравнить эффективность Globalizer с известными фреймворками Optuna и HyperOpt.
- ❑ Оценить ускорение параллельных схем на суперкомпьютере «Лобачевский».



Объект исследования: сигналы ЭКГ и датасет



Пример сегментированного сигнала из базы данных
LUDB

	P	QRS	T	Total
QTDB	3 194	3 623	3 542	10 359
LUDB	16 797	21 966	19 666	58 429

Число сегментированных волн кардиоциклов в базе данных
LUDB в сравнении с QTDB

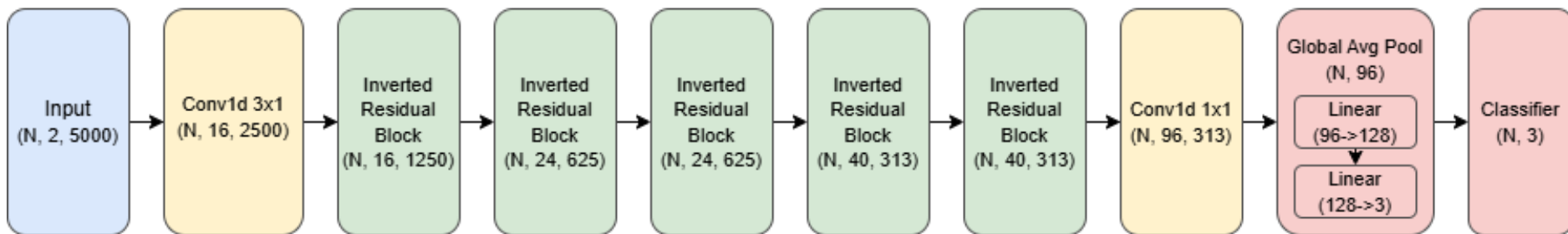
Rhythm	Number of subjects
Sinus rhythm	143
Sinus tachycardia	4
Sinus bradycardia	25
Sinus arrhythmia	8
Irregular sinus rhythm	2
Atrial fibrillation	15
Atrial flutter, typical	3
<i>Total</i>	200

Разбивка по типам сердечного ритма, представленным
в базе данных

Задача классификации: постановка и архитектура

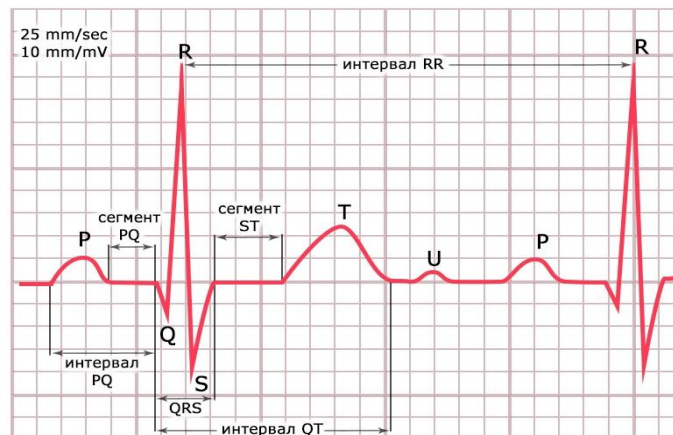
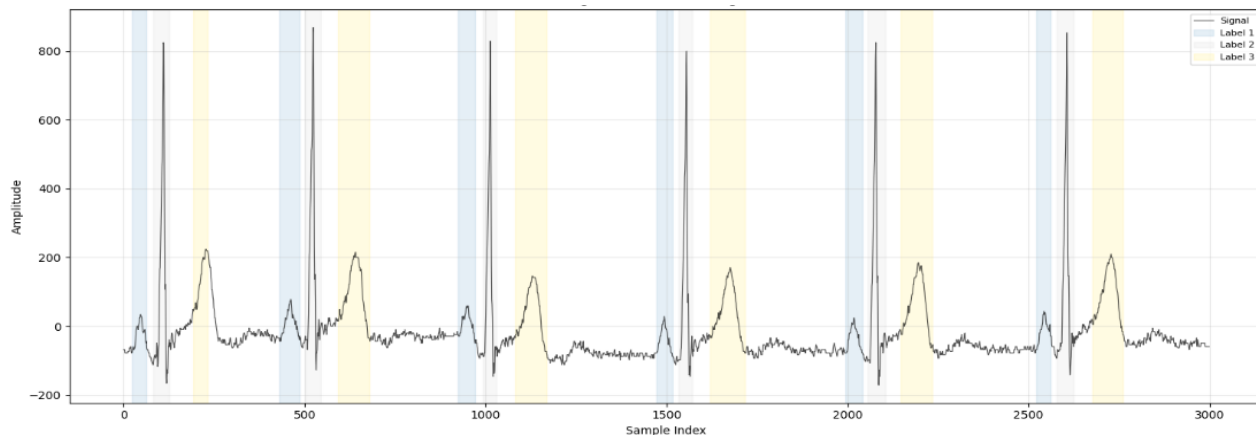
В основу задачи классификации ЭКГ-сигналов заложено разделение всех сигналов по типу ритма на три класса:

- Синусовый ритм – нормальный ритм и его физиологические вариации;
- Синусовые вариации – синусовая аритмия, брадикардия, тахикардия;
- Другой ритм – предсердный, атриовентрикулярный, идиовентрикулярный, фибрилляция.



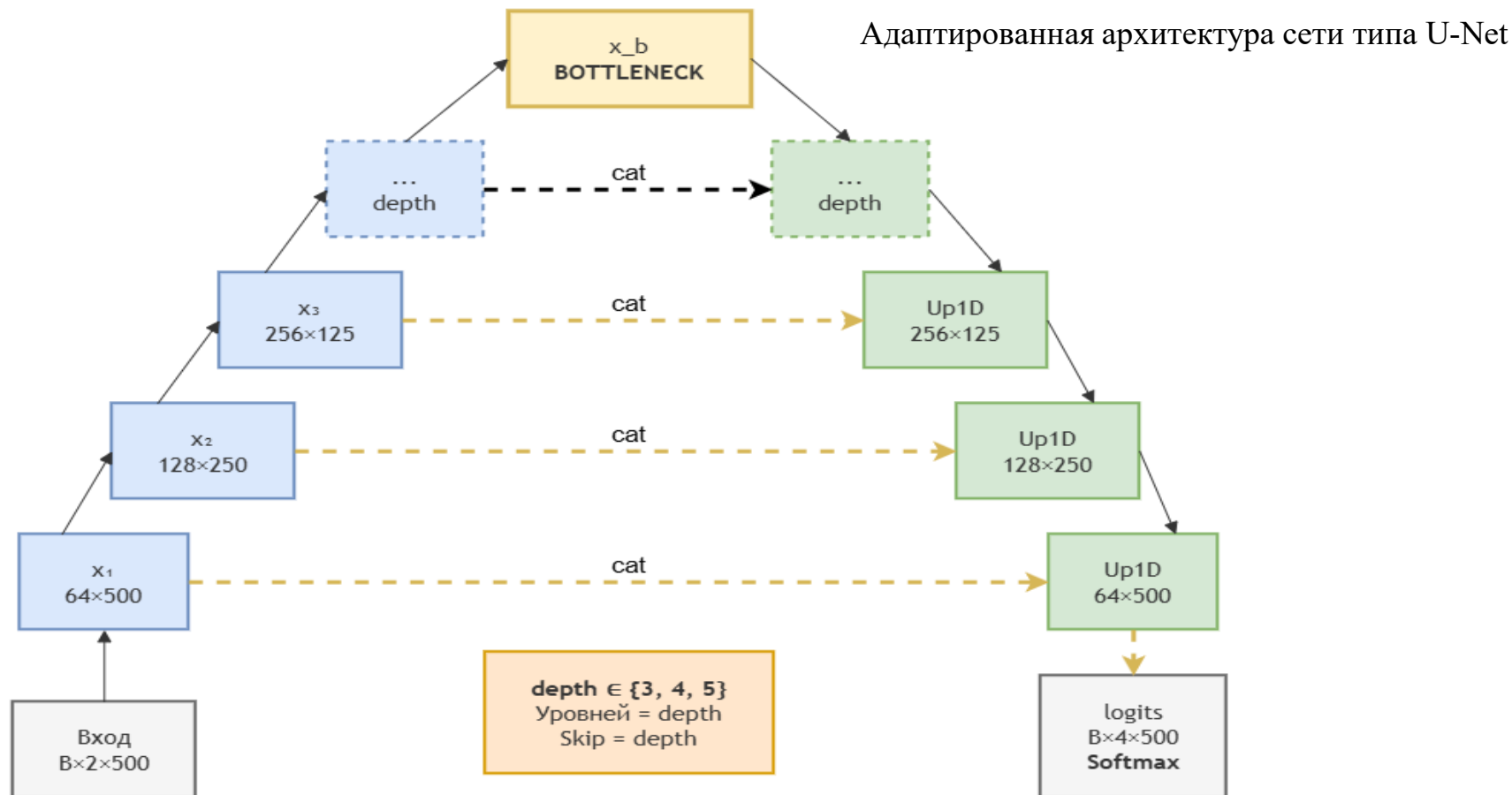
Графическое представление архитектуры MobileNetV3 Small, адаптированной под классификацию сигнала ЭКГ по двум отведениям

Задача сегментации: постановка и архитектура

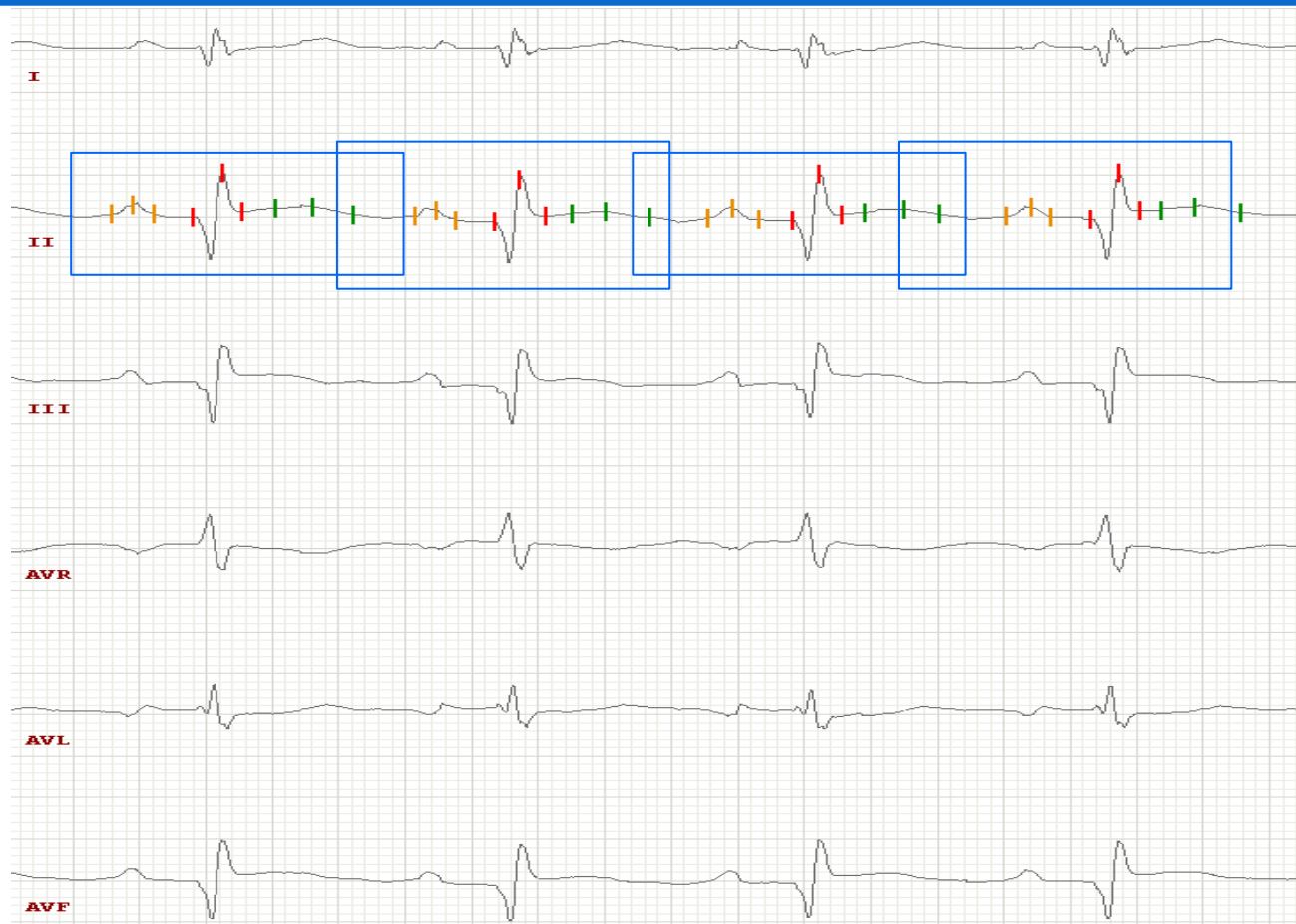


Пример сегментированного сигнала с аннотацией элементов кардиоцикла

Задача сегментации: постановка и архитектура

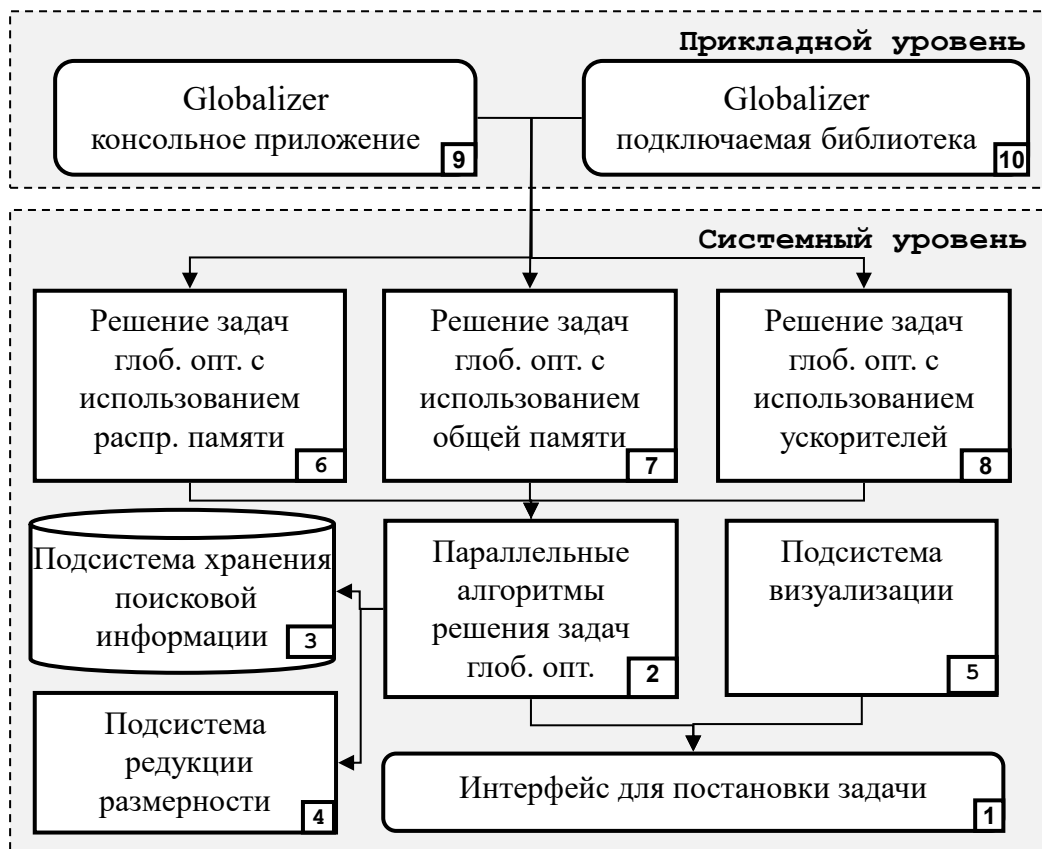


Сегментация. Данные



Пример экспертной разметки сигнала ЭКГ с нарезкой сигнала для обучения.

Метод глобальной оптимизации: система Globalizer



Параллельный алгоритм

0. Провести p «стартовых» испытаний в произвольных точках области поиска D .

1. Для каждой подобласти $D_i \subset D$ вычислить ее *характеристику* $R(i)$.

2. Отсортировать подобласти D_i по убыванию характеристик

$$R(t_1) \geq R(t_2) \geq \dots \geq R(t_p)$$

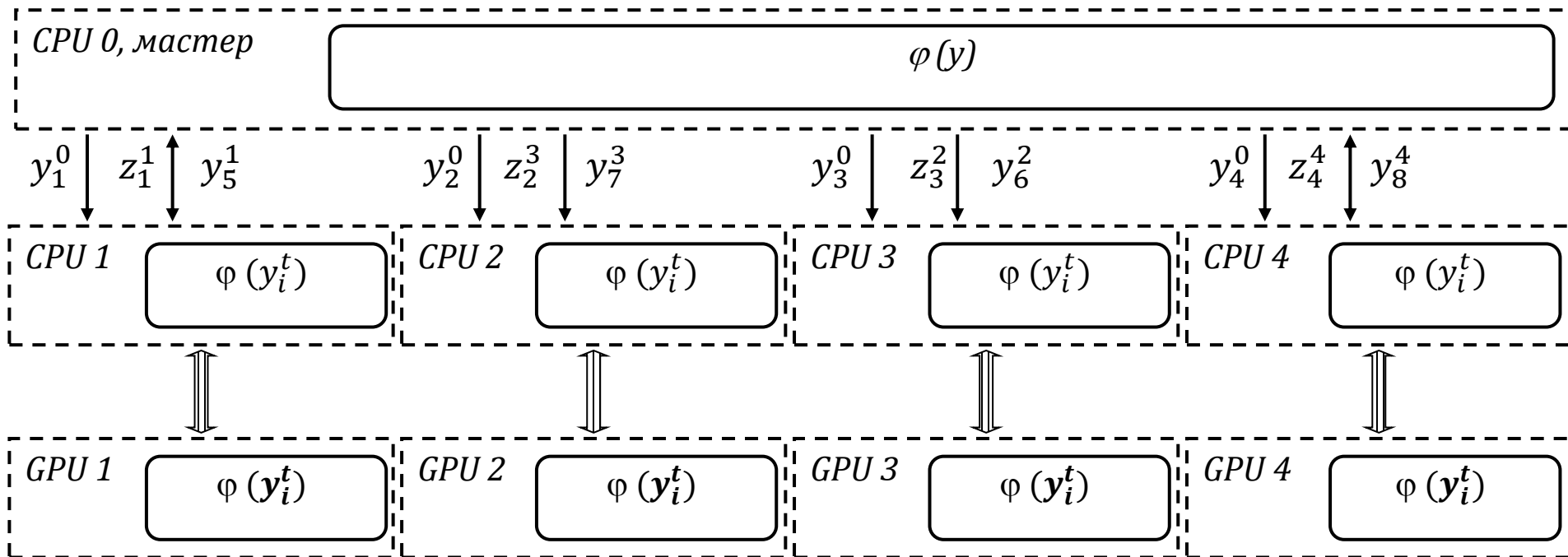
3. Провести p испытаний **параллельно** в точках $y_{t_j} \in D_{t_j}$, $1 \leq j \leq p$.

4. Стоп, если $\rho_{t_j} \leq \varepsilon$, $1 \leq t_j \leq p$

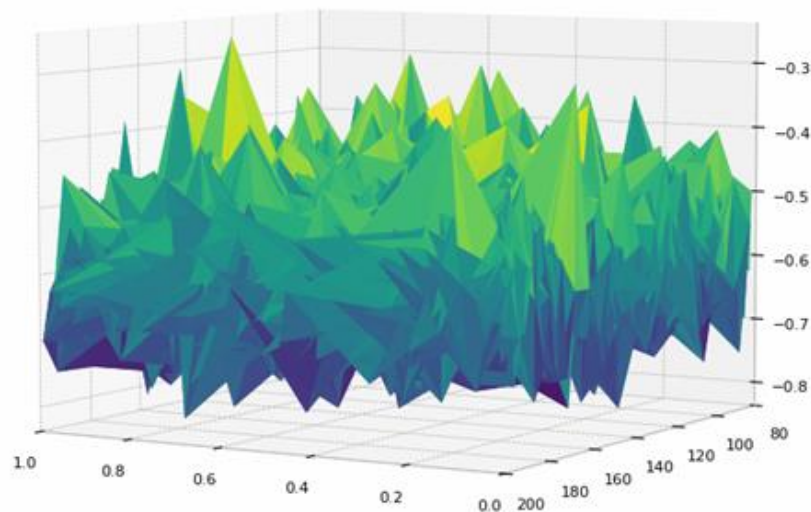
Параллельные схемы: синхронная и асинхронная

Схема асинхронных вычислений (мастер-работчие)

- Шаги 1–3 параллельного АГП выполняет «мастер»
- Координаты p испытаний распределяются по «работчим»
- Каждый «работчий» проводит испытания (вычисляет значение функции)



Результаты: классификация ЭКГ



Поверхность целевой функции для задачи классификации ЭКГ в зависимости от числа нейронов и вероятности Dropout.

P	Синхронная схема		Асинхронная схема	
	F_1^{macro}	Ускорение	F_1^{macro}	Ускорение
1	0.78	1.00	0.78	1.00
3	0.75	1.98	0.78	1.94
5	0.80	3.91	0.78	3.65
9	0.78	7.32	0.78	10.11
17	0.78	12.81	0.78	22.91
33	0.78	18.07	0.83	15.94

Поверхность целевой функции для задачи классификации ЭКГ в зависимости от числа нейронов и вероятности Dropout.

Результаты: сегментация ЭКГ

$$Precision_c = \frac{TP_c}{TP_c + FP_c}$$

$$Recall_c = \frac{TP_c}{TP_c + FN_c}$$

$$F_{1,c} = \frac{2 \cdot Precision_c \cdot Recall_c}{Precision_c + Recall_c}$$

$$F_1^{macro} = \frac{1}{C_{cls} - 1} \sum_{c=1}^{C_{cls}-1} F_{1,c}$$

P	Синхронная схема		Асинхронная схема	
	F_1^{macro}	Ускорение	F_1^{macro}	Ускорение
1	0.80	1.00	0.80	1.00
3	0.79	1.87	0.79	1.85
5	0.80	3.10	0.79	3.38
9	0.80	5.69	0.80	6.34
17	0.79	9.46	0.79	15.68
33	0.80	13.88	0.79	14.29

Результаты масштабирования для задачи сегментации ЭКГ.

Сравнение

Фреймворк	Тип метода	F1 класс.	Время	Воспроизводимость
Optuna	Байесовская	0.75	13.4 мин	Низкая
HyperOpt	TPE / случайный	0.775	12.3 мин	Низкая
Globalizer последовательный	Детерминированный	0.83	11.3 мин	Полная
Globalizer параллельный	Детерминированный	0.78	0.5 мин	Полная

Сравнение фреймворков на задаче классификации сигналов ЭКГ.

Заключение и выводы

КЛАССИФИКАЦИЯ (MobileNetV3 Small)

- Варьировались: число нейронов (80–200), Dropout (0.0–1.0)
- Достигнуто: $F1 = 0.83$
- Время: 11.3 мин (1 проц.), ускорение 22.91 (17 проц.)

СЕГМЕНТАЦИЯ (U-Net 1D)

- Варьировались: глубина сети (3–5), Dropout (0.0–1.0)
- Достигнуто: $F1 = 0.80$
- Время: 5.5 ч (1 проц.), ускорение 15.68 (17 проц.)

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

- ✓ Детерминированные методы липшицевой оптимизации эффективны
- ✓ Асинхронная схема распараллеливания даёт ускорение до 22.91
- ✓ Globalizer — практичный инструмент для получения нейросетевых моделей медицинской диагностики

ДАЛЬНЕЙШИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

- Интеграция в SoC-микроконтроллеры
- Расширение набора гиперпараметров
- Применение к другим медицинским сигналам
- Разработка микросервиса оркестрации обучения нейросетевых моделей на базе Globalizer
- Расширение области применения



<https://github.com/optimllab/globalizer>

Денис Карчков

Ст.преп. кафедры МОСТ института ИТММ

ННГУ им. Н.И. Лобачевского

karchkov@itmm.unn.ru

Технические характеристики кластера «Лобачевский»

Сервер ReShield FX 8410

- Процессор: 2 x Intel Xeon® Platinum 8558
- Объём оперативной памяти: 2048GB
- Видеоускорители: 8 x Nvidia RTX PRO 6000 Blackwell Server Edition, 96GB GDDR7.
- ОС: CentOS 7.2 Система управления: SLURM
- MPI: Intel MPI, OpenMPI



Редукция размерности на основе кривых Пеано

Важным свойством является сохранение ограниченности относительных разностей функции: если функция $g_i(y)$ в области D удовлетворяла условию Липшица с константой L_i , то функция $g_i(y(x))$ на интервале $[0,1]$ будет удовлетворять равномерному условию Гельдера

$$|g_i(y(x_1)) - g_i(y(x_2))| \leq H_i |x_1 - x_2|^{\frac{1}{N}}, 1 \leq i \leq m + 1, x_1, x_2 \in [0,1],$$

