

# Система мониторинга ЭКГ на базе IoT с анализом ИИ в реальном времени

Портативное периферийное устройство для первичной  
кардиодиагностики



## Аппаратная платформа

Raspberry Pi 5 + AD8232 + Arduino Nano

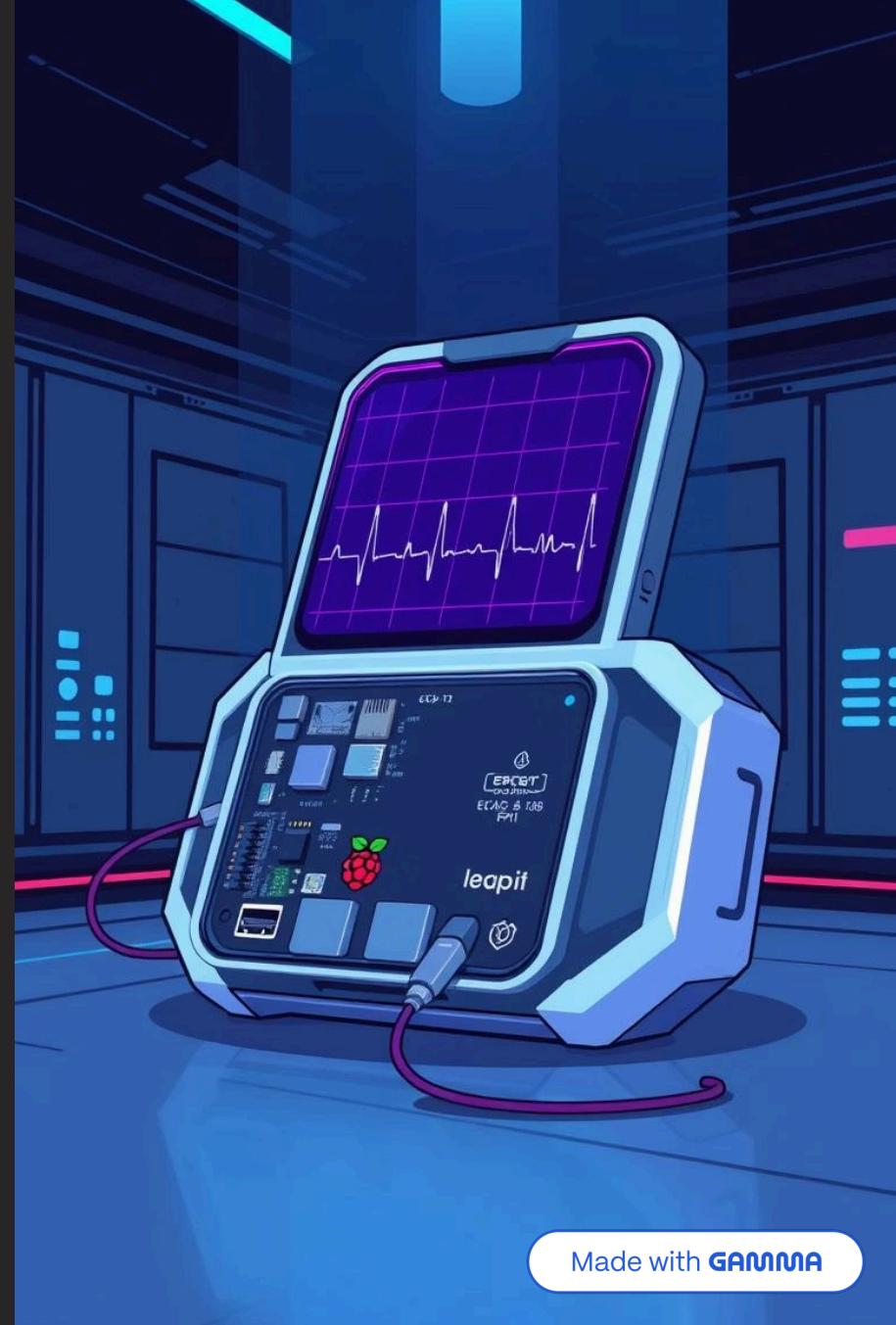


## Программный стек

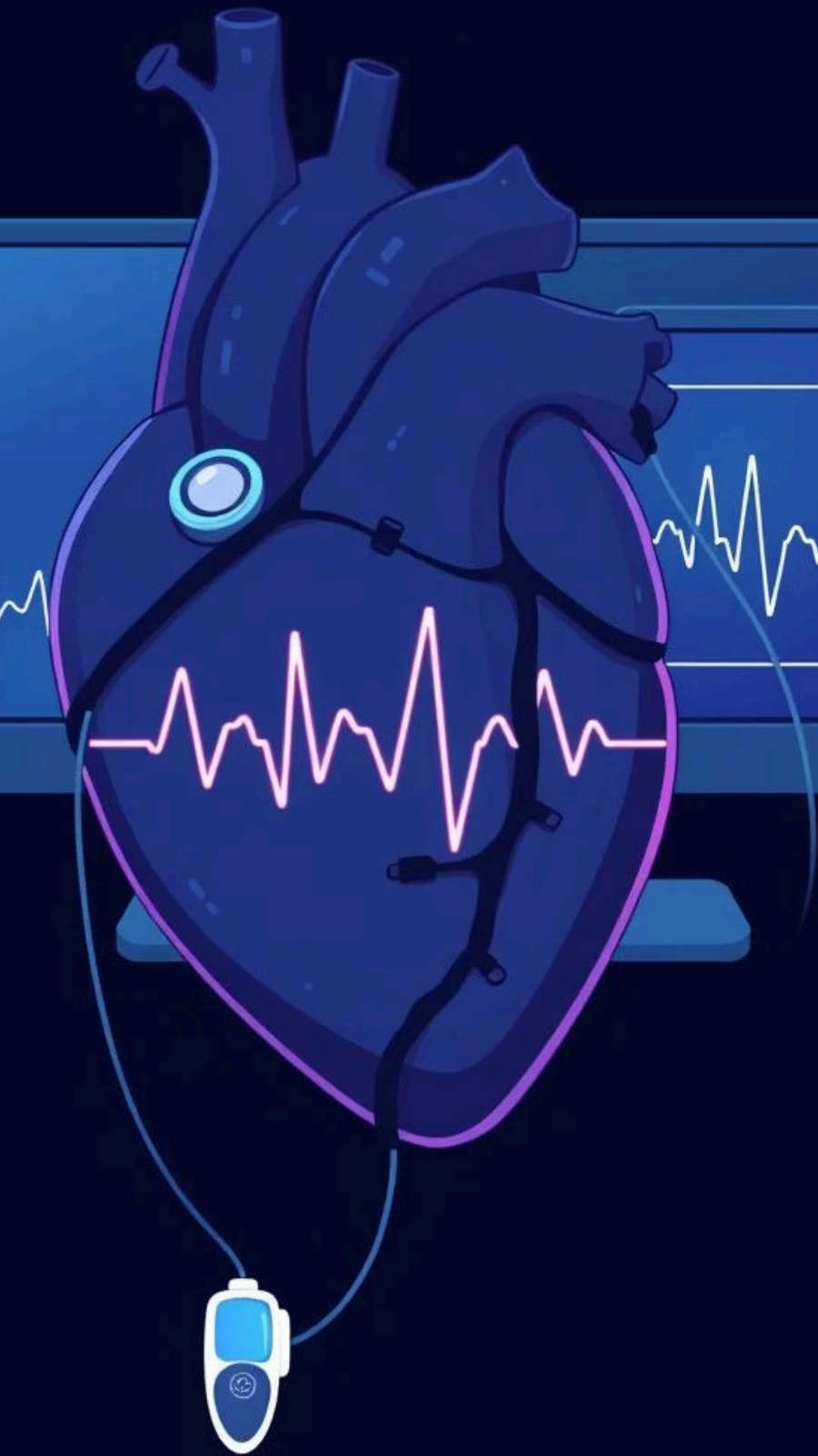
FastAPI, PyTorch, WebSocket, frp

Представил: Михаил Шабарин

16 октября 2025 г., СПбГУ, ПМ-ПУ



Made with GAMMA



# Почему это IoT-решение необходимо: Отвечая на острую потребность

Сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) остаются основной причиной смертности во всем мире. Существующие диагностические методы не удовлетворяют потребности в доступном, непрерывном и своевременном скрининге, особенно вне клинических условий.

## Проблема: Традиционные системы ЭКГ

- Стационарное и дорогостоящее оборудование.
- Требуют специализированного медицинского персонала (врачей) для эксплуатации и интерпретации.
- Отсутствие доступа к регулярному скринингу в отдаленных районах и домашних условиях.

## Решение: Подход IoT

- **Непрерывный сбор данных:** неинвазивный, долгосрочный мониторинг.
- **Автономная обработка на периферии:** анализ в реальном времени на устройстве.
- **Удаленный доступ:** Результаты доступны мгновенно без сложной облачной инфраструктуры (через 4G).

# От датчика к интерфейсу: Полная архитектура IoT-системы

Это решение объединяет специализированное оборудование и надежный программный стек для создания автономного комплексного диагностического конвейера.

Уровень датчиков

Граничный уровень

Удаленный доступ



## Уровень датчиков

- AD8232: Аналоговое получение ЭКГ-сигнала.
- Arduino Nano: Оцифровка на частоте 100 Гц, передача через UART.



## Граничный уровень (R-Pi 5)

- Прием, фильтрация данных и расчет отведений.
- Локальный вывод ИИ (PyTorch/TorchScript).
- Веб-сервер для визуализации (FastAPI).

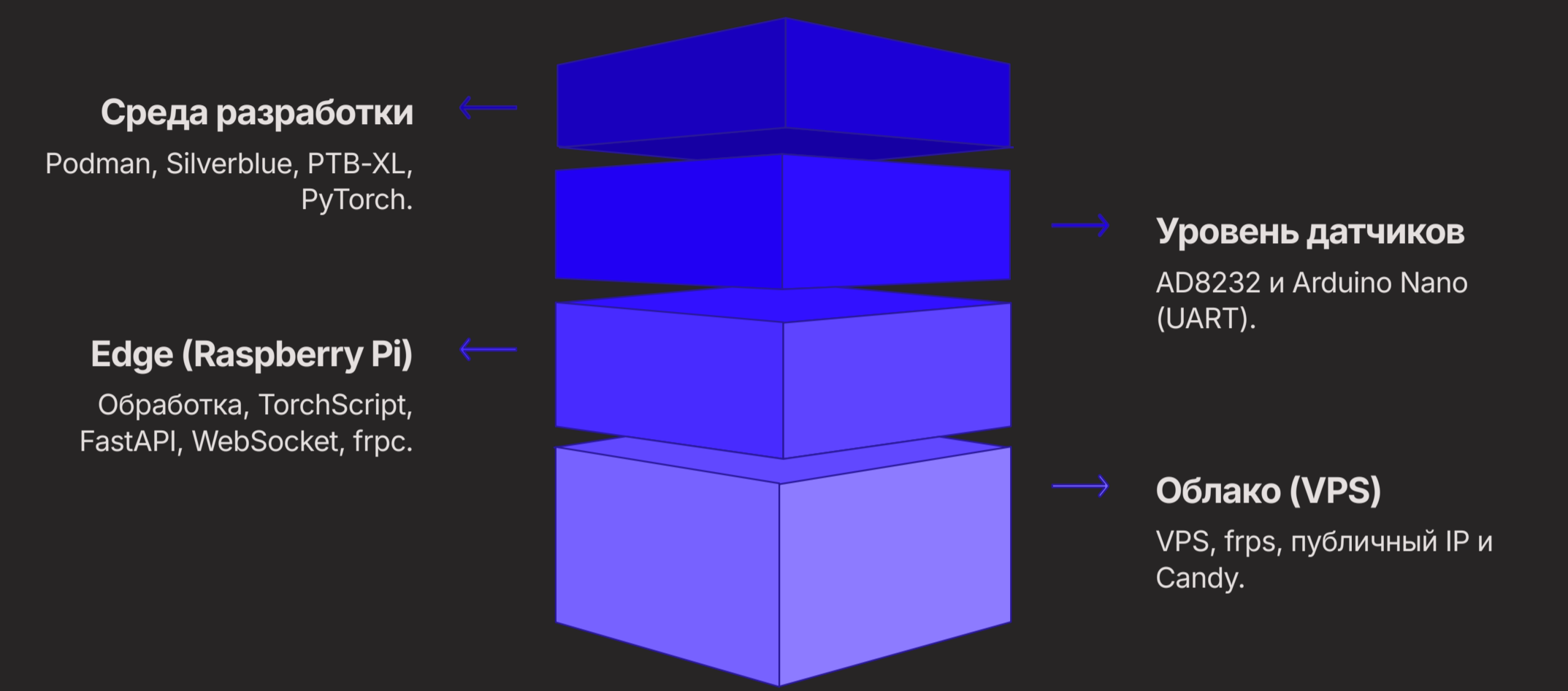


## Удаленный доступ

- Проброс портов через **frp (Fast Reverse Proxy)**.
- Обеспечивает безопасное соединение по Public IP без необходимости статического выделения.

# Архитектура приложения: Полная схема взаимодействия компонентов

Эта IoT-система охватывает весь путь данных от датчика до конечного пользователя и среды разработки, обеспечивая комплексное решение для мониторинга ЭКГ.



**Среда разработки**

- **Podman:** Контейнеризация приложения.
- **Fedora Silverblue:** Операционная система хоста.
- **PTB-XL dataset:** Используется для обучения и тестирования модели ИИ.

**Уровень датчиков**

- **AD8232:** Аналоговый датчик ЭКГ.
- **Arduino Nano:** Оцифровка сигнала (100 Гц), передача данных по UART.
- Подключение к Raspberry Pi через Serial Monitor.

**Граничный уровень (Raspberry Pi 5)**

- **Обработка данных:** Фильтрация, расчет 12 отведений.
- **Модель ИИ:** Локальный вывод на основе PyTorch/TorchScript.
- **FastAPI Web Server:** Визуализация данных, WebSocket для данных в реальном времени.
- **frps клиент:** Установка обратного туннеля к VPS.

**Облачный уровень (VPS)**

- **frps сервер:** Прием туннеля от frps, предоставление доступа.
- **Публичный IP:** Доступ к веб-интерфейсу через frp.
- **Candy :** Кеширо.

# Обработка данных на периферии: Нулевая задержка, максимальная конфиденциальность

Обработка необработанного сигнала непосредственно на Raspberry Pi минимизирует накладные расходы на передачу данных и обеспечивает немедленную обратную связь, что является критически важной функцией для мониторинга в реальном времени.

01

## Получение необработанных данных

Прием потоков необработанных сигнальных данных по UART от Arduino.

02

## Реконструкция отведений

Расчет 6 стандартных отведений ЭКГ с использованием сложных формул Эйнтховена из полученного двухпроводного сигнала.

03

## Кондиционирование сигнала

Применение полосно-пропускающей фильтрации (**0.5–40 Гц**) для удаления дрейфа изолинии и высокочастотного шума.

04

## Нормализация и вывод

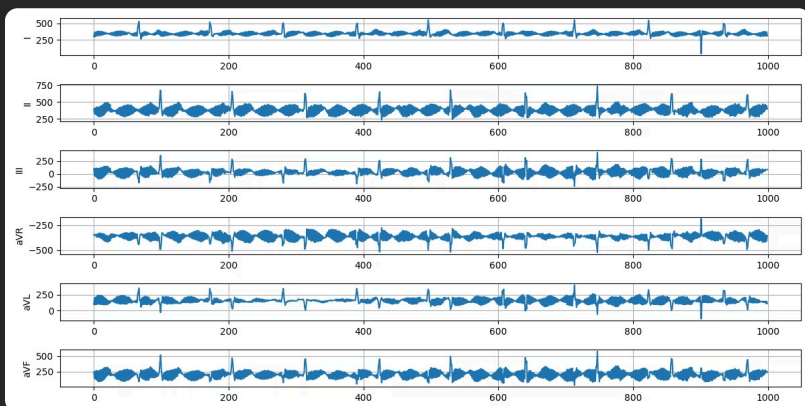
Нормализация данных для соответствия формату набора данных PTB-XL, сохранение в .пру и генерация GIF для визуального контроля.

Ключевые преимущества периферийной обработки:

- Минимизирует объем передаваемых данных.
- Обеспечивает работу **без постоянного доступа к интернету**.
- Повышает конфиденциальность данных, поскольку конфиденциальные медицинские данные не покидают устройство.

# Модуль ИИ: Многоклассовая классификация патологий на Raspberry Pi

Основная диагностическая функция обеспечивается сверточной нейронной сетью, оптимизированной для низкопотребляющих граничных вычислительных сред.



## Технические характеристики

- Модель: Компактная **Convolutional Network**.
- Данные для обучения: набор данных **PTB-XL** (21 837 исчерпывающих записей ЭКГ).
- Охват: Поддерживает **19 диагностических меток** (аритмии, блокады, синдромы).
- Развертывание: Экспортировано в **TorchScript** для оптимизированного вывода на CPU.
- Производительность: Время вывода **менее 2 секунд** для 10-секундной записи.

📌 **Актуальность для IoT:** Возможность автономного и офлайн выполнения сложных диагностических алгоритмов критически важна для развертывания надежных телемедицинских решений в условиях ограниченных ресурсов.

# Преодолевающая разрыв: Адаптация модели к реальным данным IoT

Качество клинического набора данных (PTB-XL) значительно выше, чем полевые данные с портативных двухканальных датчиков (AD8232). Успешное развертывание модели потребовало стратегической адаптации.

## Задача

PTB-XL использует 12 клинических отведений. Наша установка AD8232 предоставляет только 2 отведения с присущими им шумом и характеристиками импульсного сигнала.

## Стратегия адаптации

Применение гауссовского сглаживания для лучшего имитирования сложной морфологии волн и использование нормализации амплитуды вместо масштабирования по z-оценке.

## Настройка классификации

Снижение порога классификации до **0.1** и смещение акцента с обнаружения «идеальных» меток на выявление наиболее вероятных первичных патологий.

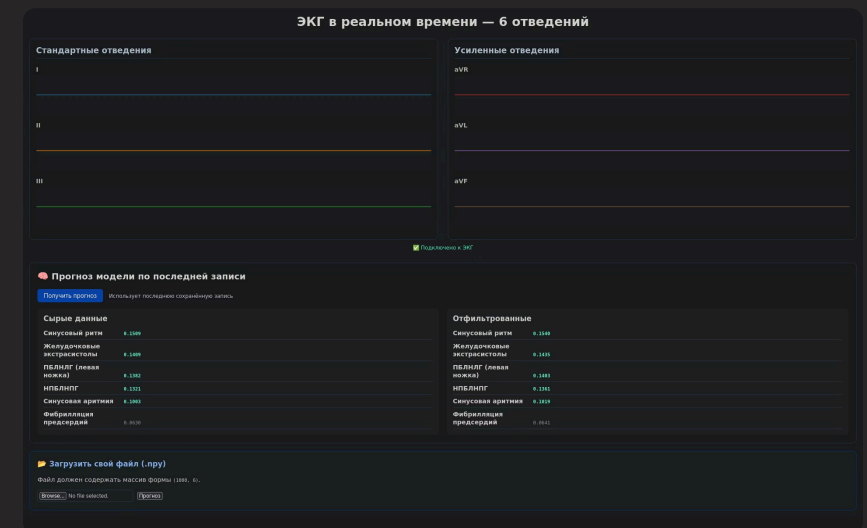
Результатом этих корректировок стала модель, способная давать **интерпретируемые предсказания** даже при подаче уменьшенных 2-канальных данных, что доказывает осуществимость подхода edge-AI.

# Веб-интерфейс и удаленный доступ: делаем диагностику доступной

Локальный веб-сервер предоставляет пользовательский интерфейс, а **frp** превращает систему в мощный, удаленно доступный хаб без затрат на статический IP-адрес.

## Функциональность веб-сервера (FastAPI)

- Отображение 6 отведений ЭКГ в реальном времени через **WebSocket + Chart.js**.
- Кнопка "Анализировать" в один клик для запуска AI-вывода на последнем записанном сегменте.
- Возможность загружать и анализировать пользовательские файлы **.pru**.
- Автоматическое хранение 10-секундных записей.



## Инфраструктура IoT: frp (Fast Reverse Proxy)

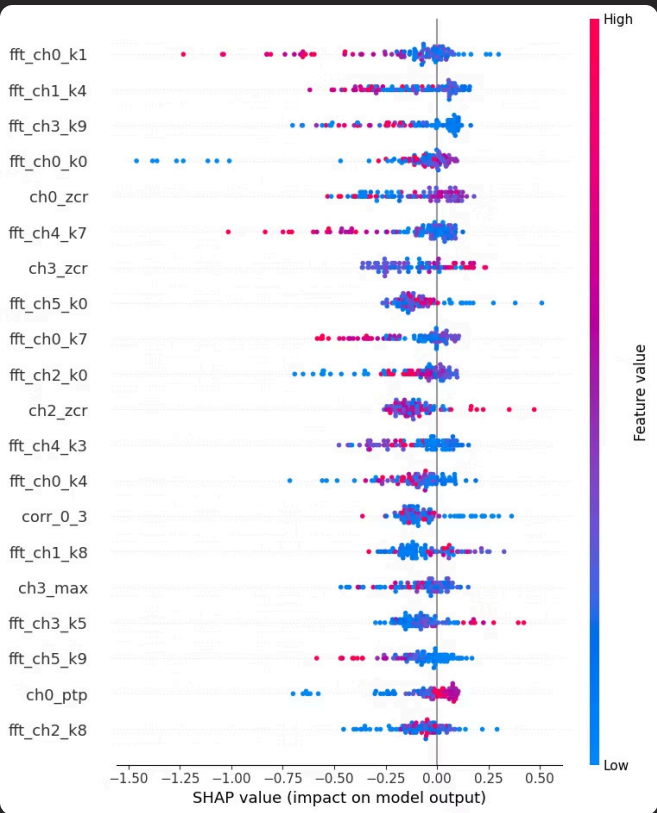
Клиент **frpc** на Raspberry Pi подключается к серверу **frps** на VPS, перенаправляя порт 8000. Это обеспечивает доступ через **your-vps:8000**, поддерживая доступ к нескольким службам с одного Virtual Private Server.

# Демонстрация работы системы: Практические примеры

На этом слайде мы покажем систему в действии, демонстрируя ее функциональность от получения данных до визуализации и анализа.

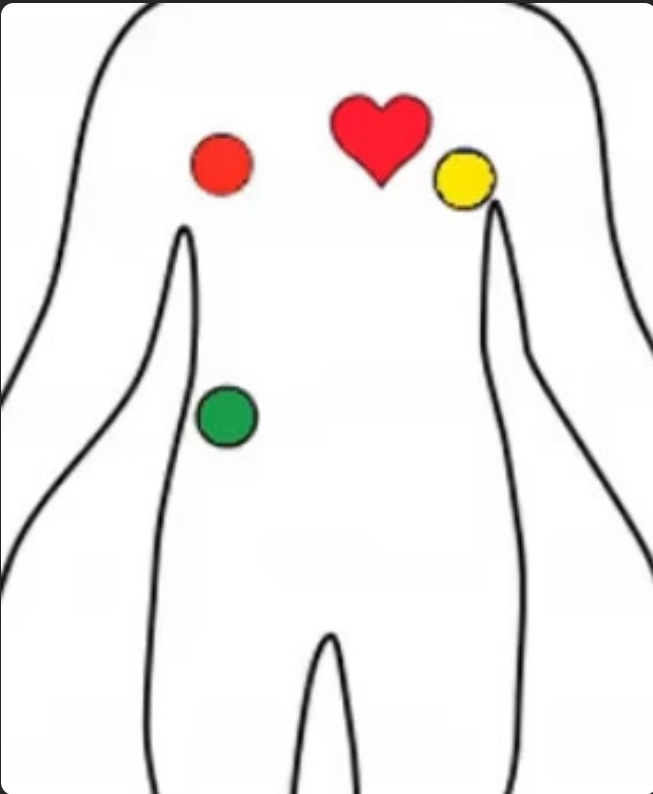
## Влияние признаков на прогноз модели

Как признаки влияют на выход модели — положительно (красный) или отрицательно (синий). Помогает понять, какие характеристики ЭКГ наиболее значимы для классификации патологий.



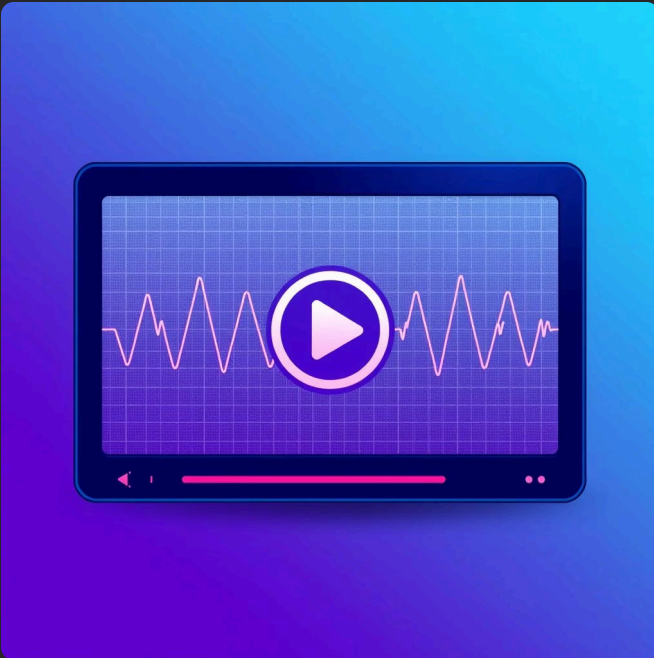
## Правильное размещение электродов

Визуальное руководство по точному размещению двух электродов AD8232 для оптимального сбора сигнала.



## Пример работы системы (видео)

Краткое видео, демонстрирующее полный цикл работы системы — от датчика до веб-интерфейса.



# Результаты и текущие ограничения

Проект успешно продемонстрировал жизнеспособный прототип edge-IoT, но его реальное развертывание сталкивается с внутренними техническими трудностями и проблемами качества данных.

## ✓ Достижения

- Полностью функциональный IoT прототип: Сенсор → Edge → Интерфейс.
- Доказанная локальная возможность AI анализа без использования облачных вычислений.
- Достигнут удаленный публичный доступ через frr без инфраструктуры статического IP.
- Разработана открытая и воспроизводимая аппаратная и программная архитектура.

## ⚠ Текущие ограничения

- Сниженная диагностическая точность из-за использования 2 отведений по сравнению с 12 отведениями, используемыми в обучающем наборе клинических данных.
- Высокая загрузка CPU на Raspberry Pi, что создает риск перегрева при длительной непрерывной работе.
- Качество сигнала очень чувствительно к качеству контакта электродов и артефактам движения.

# Будущее развитие: Преобразование в масштабируемую IoT-платформу

Прототип закладывает основу для надежной, масштабируемой платформы мониторинга здоровья, ориентированной на производительность, целостность данных и совместимость.

## → Оптимизация на Edge

Внедрение квантования модели и исследование ONNX Runtime для более быстрого и эффективного инференса на Edge.

## → Уточнение данных и моделей

Сбор специализированного набора данных AD8232 для тонкой настройки модели с целью повышения точности полевых данных.

## → Расширенная аналитика

Интеграция расчетов variability сердечного ритма (HRV) и частоты сердечных сокращений (HR) для расширения диагностических возможностей.

## → Пользовательский опыт


Разработка специализированного мобильного приложения (Flutter/React Native) для замены текущего веб-интерфейса и улучшения удобства использования.

## → Взаимодействие

Включение функции экспорта SCP-ECG для обеспечения бесшовной интеграции с существующими медицинскими IT-системами и EMRs.

## → Поддержка нескольких пользователей

Масштабирование настройки фр для поддержки нескольких независимых пользователей/устройств, превращая VPS в децентрализованный телемедицинский хаб.



# Заключение: IoT для доступного, автономного и интеллектуального кардиомониторинга

Проект успешно подтвердил техническую и практическую осуществимость граничной IoT системы для мониторинга ЭКГ, доказав, что высококачественный скрининг может быть децентрализованным и доступным.

## Валидация архитектуры

Мы реализовали **полноценную IoT архитектуру**: датчик → edge → интерфейс → удаленный доступ.

## Автономность и конфиденциальность

Система работает **без зависимости от облака**, обеспечивая конфиденциальность данных и минимизируя задержки сети.

## Доступность

Решение является **открытым, недорогим (~\$50)** и готовым к масштабированию.

## Потенциальные применения

- Сельская телемедицина и домашний уход.
- Образовательные и лабораторные условия для биомедицинской инженерии.
- Персональный скрининг здоровья для пожилых людей и групп риска.