

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
(НИЯУ МИФИ)»

УДК 550.35, 539.16, 519.685

ОТЧЁТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Мониторинг скорости счета гамма-квантов,  
регистрируемых в подземном детекторе LVD, с целью предсказания  
сильных сейсмических событий

Научный руководитель

К.ф.-м.н., с.н.с., зав.лаб. ИЯИ РАН

Агафонова Н.Ю.

Студент

Комлык Е.Р.

Консультант

Вед. инж. ИЯИ РАН

Ингерман С.В.

Москва 2025

# СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1. Детектор большого объёма (LVD).....	4
1.1. Описание установки .....	4
1.2. Методика регистрации .....	5
1.3. Гамма-кванты от распада радона – фон эксперимента.....	6
1.4. Предвестники землетрясений .....	7
2. Веб-приложение.....	8
2.1. Постановка задачи .....	8
2.2. Используемый инструментарий .....	9
2.2.1. Flask .....	9
2.2.2. Apache.....	10
2.3. Принципы работы .....	11
2.3.1. Архитектура приложения .....	11
2.3.2. Схема взаимодействия с пользователем .....	13
2.3.3. Алгоритм работы .....	15
2.4. Пример интерфейса пользователя.....	17
Заключение .....	19
Список литературы .....	20

# ВВЕДЕНИЕ

## **Актуальность**

Расположенный в подземной лаборатории Гран-Сассо, Италия, сцинтилляционный детектор LVD регистрирует гамма-кванты от естественной радиоактивности материалов конструкции и грунта, окружающего установку. Гамма-кванты (с энергией до 3 МэВ) рождаются от распадов радиоактивных радона и торона, от цепочек распадов Урана и Тория. Известно, что перед мощными землетрясениями происходит усиленный выход подземного радона из микротрещин грунта.

Исследование вариаций скорости гамма-квантов с использованием накопленной статистики архивных данных за более чем 20 лет и онлайн мониторинг выхода радона поможет изучать, как предвестники землетрясений, так и фон в экспериментах по поиску нейтрино и частиц темной материи в низкофоновой лаборатории Гран-Сассо.

## **Цель исследований**

Целью работы является разработка веб-приложения для визуализации экспериментальных данных, по скорости счета гамма-квантов, регистрируемых детектором LVD, от естественной радиоактивности. Необходимо графическое представление временных рядов, как архивных данных (с 1993 по 2024 г), так и онлайн мониторинг.

## **Задачи исследований**

- Изучить работу детектора LVD, его характеристики и физику экспериментальных исследований.
- Изучить особенности формирования экспериментальных данных по программе исследований вариаций гамма-квантов для нахождения критериев предвестников землетрясений в центральной Италии.
- Создание сервера, включающий в себя пакет подпрограмм, с возможностью удалённого доступа.
- Компоновка функционала для анализа временных рядов.

# 1. ДЕТЕКТОР БОЛЬШОГО ОБЪЁМА (LVD)

## 1.1. Описание установки

Детектор LVD (Large Volume Detector) расположен на глубине 3650 м в.э. в зале А лаборатории Гран-Сассо (рис. 1). Установка сконструирована для регистрации нейтрино, возникающих при коллапсах звездных ядер в нашей Галактике.

Детектор содержит 1000 тонн жидкостного сцинтиллятора на основе уайт-спирта ( $C_nH_{2n}$ ), который заполняет 840 счетчиков объемом  $1.5 \text{ м}^3$  каждый. Счетчики имеют форму параллелепипеда ( $100 \times 100 \times 150 \text{ см}^3$ ) и изготовлены из нержавеющей стали. На верхней грани каждого счетчика установлены три фотоумножителя, работающие в режиме совпадения. Счетчики размещены по 8 штук в металлические модули-контейнеры (портатанки), из которых формируются вертикальные колонны. Пять колонн из 7 портатанков объединяются в одну башню, таким образом, одна башня содержит 35 модулей с 280 счетчиками (рис. 2).

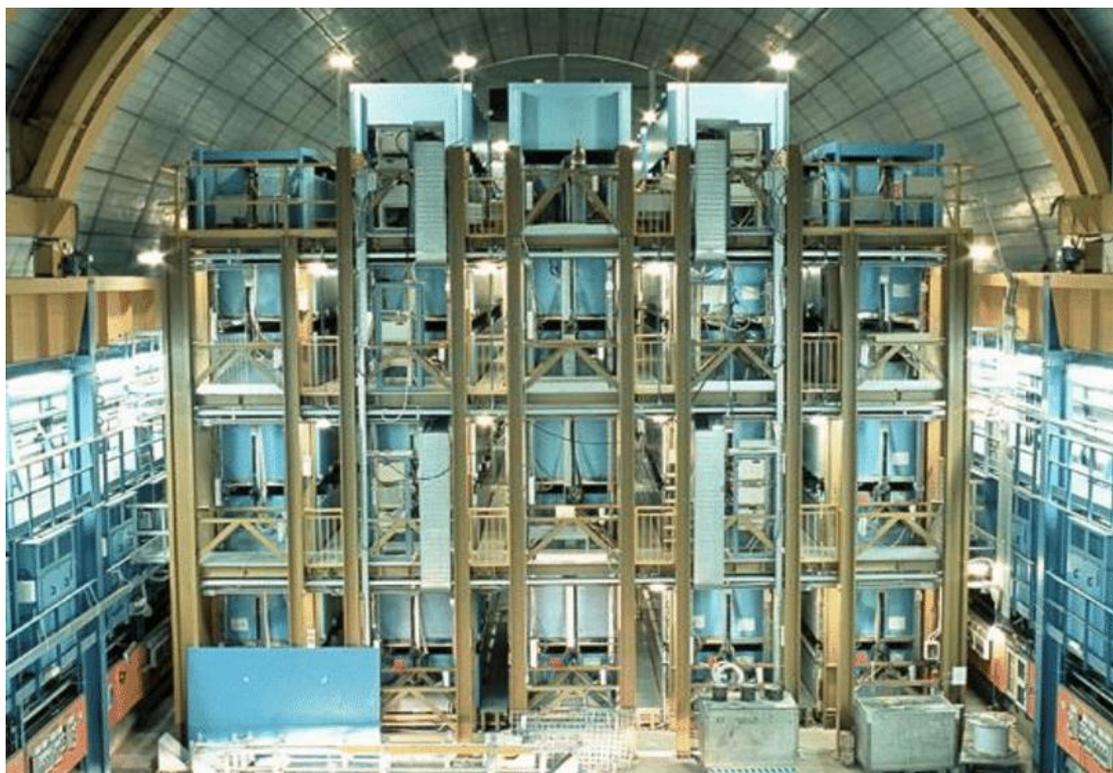


Рис. 1. Детектор LVD в лаборатории Гран-Сассо

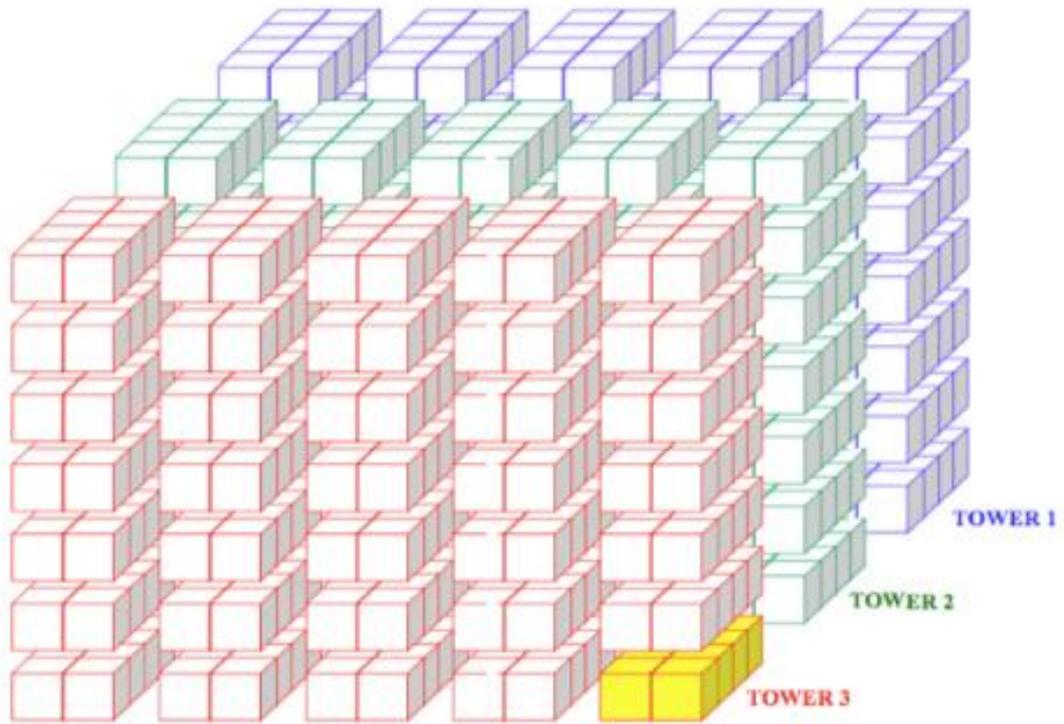


Рис. 2. Пространственная конфигурация счётчиков в составе детектора

## 1.2. Методика регистрации

Для разных научных задач в детекторе имеется два энергетических порога: верхний  $E_{HET} = 4$  МэВ, и нижний  $E_{LET} = 0.5$  МэВ. Данные низкоэнергетического порога используются для исследования фона эксперимента и контроля работы счетчиков [1].

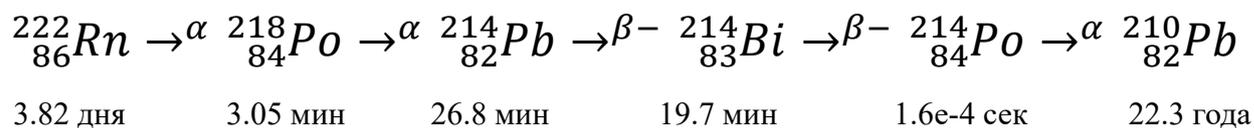
Установка LVD способна регистрировать нейтрино всех типов по реакциям взаимодействия с ядрами веществ, входящих в её структуру – водородом, углеродом, железом. Основной реакцией взаимодействия антинейтрино является обратный бета-распад (реакция ОБР):  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ ,  $E_e = E_\nu - 1.3$  МэВ, которая создает два детектируемых сигнала: первый сигнал вызывается позитроном, следующий за ним – захватом нейтрона протоном:  $n + p \rightarrow d + \gamma$  ( $E_\gamma = 2.2$  МэВ, среднее время захвата около 185 мкс) или железом, входящим в структуру установки:  $n + {}^{56}_{26}Fe \rightarrow {}^{57}_{26}Fe + \Sigma\gamma$  ( $E_\gamma \sim 7$  МэВ,  $\tau \sim 110$  мкс).

Фоном детектора LVD при поиске нейтрино являются атмосферные мюоны (средняя энергия которых около 280 ГэВ, скорость счёта мюонов на счетчик  $\sim 10^{-4} \text{сек}^{-1} \text{счётчик}^{-1}$ ), и естественная радиоактивность скального грунта и материалов установки (для внутренних счетчиков первой башни ( $\sim 45 \text{сек}^{-1} \text{счётчик}^{-1}$ )).

### 1.3. Гамма-кванты от распада радона – фон эксперимента

Основным источником фона на установке LVD является радон. Естественный радиоактивный газ образуется в результате распада радия, который, в свою очередь, является продуктом распада урана-238. Благодаря своим уникальным свойствам радон служит важным индикатором в различных геологических исследованиях. Этот газ постоянно генерируется в горных породах в процессе радиоактивного распада, что делает его присутствие неизменным в любом горном массиве. Уменьшение концентрации радона происходит по двум основным причинам: а) в результате его распада (период полураспада радона составляет 3.825 дня), и б) из-за миграции газа из массива в атмосферу. Однако новая генерация радона возникает из цепочки распадов урана, что обеспечивает постоянное среднее содержание радона в грунте, определяемое концентрацией урана (радия) в данном массиве.

Установка LVD способна регистрировать гамма-кванты, возникающие при распадах дочерних ядер радона  ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ . Наиболее вероятная цепочка радиоактивных распадов выглядит следующим образом:



Гамма-излучение в основном создается ядрами  ${}^{214}_{83}\text{Bi}$ , которые, распадаясь, превращаются в  ${}^{214}_{84}\text{Po}$  с характерным временем распада  $\tau=19.7$  мин. Энергетический спектр гамма-излучения охватывает диапазон от 0.6 до 2.5 МэВ.

Данные детектора, используемые для исследования фона ( $E_{LET}$ ), формируются следующим образом: каждые 10 минут все сцинтилляционные счётчики башни запускаются импульсом от генератора для регистрации  $E_{LET}$ , импульсов в течение 10 секунд. Ввиду невысоких энергий гамма-кванты проникают в счётчик главным образом через верхнюю грань, толщина металла которой 4 мм. Боковые и нижняя грани экранированы дополнительными 20 мм металла.

При обработке данных отбираются наиболее стабильно работающие в течение длительного времени счётчики. Суммарный темп счета нормируется на один счётчик в герцах (Hz) и измеряется автоматически. Количество отсчетов, обусловленных радоном, для 70 внутренних счетчиков одной башни составляет примерно 300000 за 10 секунд. Это обеспечивает чувствительность метода 5% на уровне  $3\sigma$ , что означает, что за 10-секундный интервал измерений установка сможет зафиксировать 5%-е отклонение концентрации с достоверностью 99.7%. Данные суммируются в бине за 1 час. Общее число отсчетов в одном бине составляет около 184000 (420 отсчетов за 10 секунд  $\times$  73 счётчика  $\times$  6 запусков в час), что приводит к относительной ошибке измерений в 0.2%.

#### **1.4. Предвестники землетрясений**

Некоторые исследования [2]-[4] указывают на связь аномальных выбросов радона с крупными землетрясениями, что может свидетельствовать о деформации земной коры. Радиоактивные свойства радона делают его мощным индикатором движения земной коры и потенциально эффективным маркером для изучения процессов, связанных с подготовительной фазой землетрясений.

Исследования, направленные на выявление связи между поведением радоновых полей и сейсмической активностью, проводятся по всему миру на протяжении многих десятилетий. В экспериментальных данных LVD

наблюдается отклик установки на увеличение сейсмической активности. В некоторых случаях фиксируется рост концентрации радона за 2–3 дня до землетрясения, что внушает надежду на возможность предсказания предстоящих событий.

Измерения температуры, влажности и давления в зале установки показали, что условия эксплуатации детектора стабильны как в краткосрочной (в течение суток), так и в долгосрочной перспективе (в течение года) [3]. Это создает благоприятные условия для выявления резких изменений концентрации радона и, возможно, для определения предвестников землетрясений.

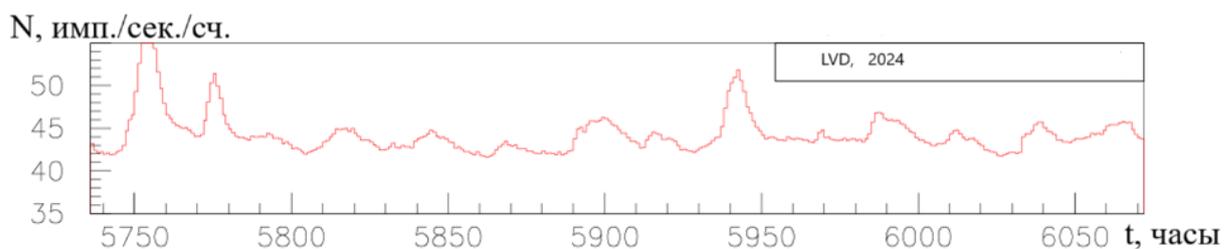
Однако прогнозирование землетрясений требует предсказания с определенной достоверностью трех характеристик: силы, времени и места очага землетрясения. В настоящее же время проводятся исследования по выявлению источников фоновых радоновых событий [5] и определению характеристик вариаций концентрации радона под землей, которые коррелируют со временем сильных землетрясений.

## **2. ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ**

### **2.1. Постановка задачи**

Задача визуализации данных эксперимента по регистрации гамма-квантов от распада радона включает в себя как отображение архивных данных (радоновых данных), так и онлайн мониторинг за последние 2-3 суток.

Радоновые данные – это временные ряды скорости счета гамма-квантов, усредненные за час работы детектора и нормированные на число стабильно работающих счетчиков (приведенные в секунду) Рис. 3.



*Рис.3. Пример временного ряда скорости счета гамма-квантов на LVD за 2024 год, время в часах с начала года, бин – 1 час.*

Одним из важных требований к реализации является возможность простого и быстрого удалённого доступа.

## **2.2. Используемый инструментарий**

### **2.2.1. Flask**

Для выполнения задачи было принято решение разработать веб-приложение с помощью микрофреймворка Flask [6] на языке Python. Он был выбран благодаря его минималистичному подходу и гибкости, что позволяет быстро разрабатывать и адаптировать приложение под конкретные требования.

Flask основывается на WSGI (Web Server Gateway Interface) и использует Jinja2 в качестве шаблонизатора, что дает возможность эффективно генерировать динамический HTML-контент. Jinja2 поддерживает мощные функции, такие как: наследование шаблонов, фильтрацию данных и управление логикой отображения, что упрощает создание сложных интерфейсов и улучшает организацию кода.

Фреймворк поддерживает множество расширений, которые можно подключать по мере необходимости. Это позволяет добавлять функциональность, такую как: работа с базами данных (например, с использованием Flask-SQLAlchemy), аутентификация пользователей (с помощью Flask-Login) и другие возможности, не требуя переписывания основного кода приложения.

В целях обеспечения онлайн мониторинга экспериментальных данных можно использовать AJAX (Asynchronous JavaScript and XML), который позволяет динамически обновлять данные на клиентской стороне без необходимости перезагрузки веб-страницы.

Кроме того, с помощью Flask можно легко интегрировать библиотеки для работы с данными и их визуализации, такие как Pandas и Matplotlib, поскольку они также написаны на Python.

### 2.2.2. Apache

Для обеспечения удалённого доступа к приложению будет создан веб-сервер на основе Apache HTTP Server [8]. Он служит посредником между пользователем, использующим браузер, и сервером, обеспечивая передачу данных при запросах.

Apache работает по принципу обработки запросов от клиентов. Когда пользователь отправляет запрос через браузер (например, запрашивает веб-страницу), происходит следующий процесс:

1. Получение запроса: Apache "слушает" определенные порты, когда на один из этих портов поступает запрос, сервер начинает его обработку.
2. Обработка запроса: Сервер анализирует запрос и обращается к конфигурационным файлам, чтобы определить, как его обработать. Это может включать в себя поиск запрашиваемого файла или выполнение скрипта.
3. Ответ клиенту: после обработки запроса сервер формирует ответ (например, HTML-страницу) и отправляет его обратно клиенту через браузер.

Apache использует процессную модель для обработки соединений. Каждое соединение помещается в отдельный поток или процесс, что позволяет обрабатывать несколько запросов параллельно. Однако это также может привести к перегрузке сервера при большом количестве пользователей.

## 2.3. Принципы работы

### 2.3.1. Архитектура приложения

Приложение спроектировано как совокупность функционально изолированных компонентов, каждый из которых отвечает за определённый аспект его работы. Такая модульная архитектура облегчает поддержку, развитие и потенциальную замену отдельных блоков без затрагивания остальной системы.

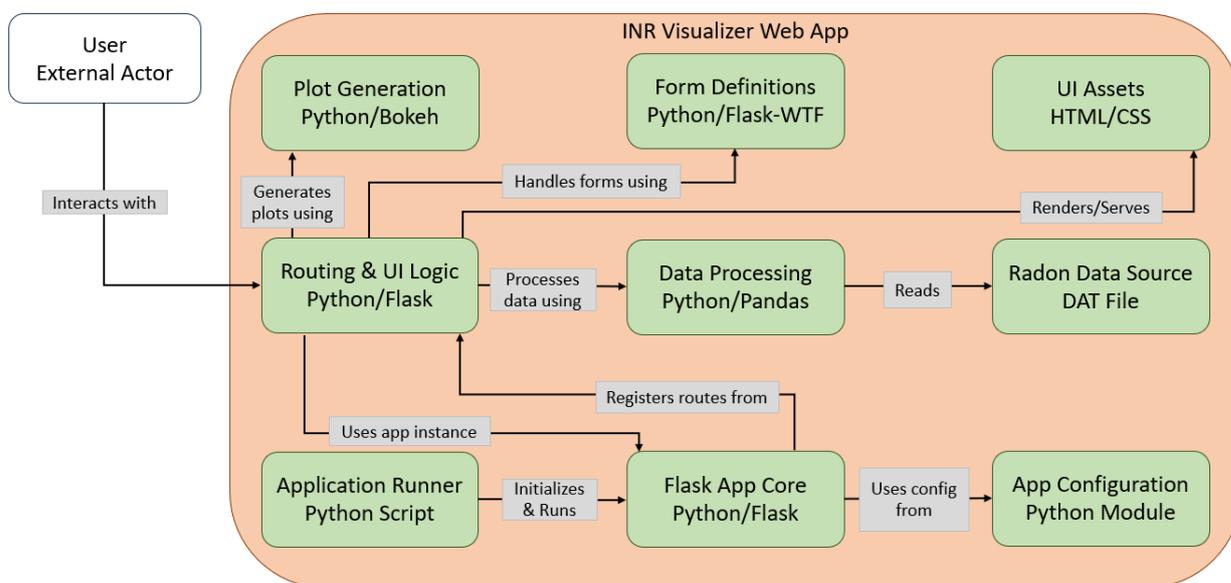


Рис.4. Схема архитектуры приложения

На схеме (рис. 4) представлены основные компоненты приложения, разделённые логически на следующие подсистемы:

#### 1. Пользовательский интерфейс (Frontend).

Компоненты, взаимодействующие с пользователем, реализованы через HTML/CSS и JavaScript (включая встроенные Bokeh-компоненты). К ним относятся:

- UI Assets — статические ресурсы, такие как шаблоны и стили, определяющие внешний вид;
- Form Definitions — определение веб-форм для пользовательского ввода;

- Plot Generation — построение интерактивных графиков на стороне сервера с последующим встраиванием в HTML (с возможностью последующего управления ими на клиенте).

## 2. Серверная логика (Backend).

Основная логика приложения реализована на Flask и связана с обработкой запросов, маршрутизацией, подготовкой и загрузкой данных:

- Application Runner — скрипт запуска, инициализирующий всё приложение;
- Flask App Core — базовый объект приложения Flask;
- Routing & UI Logic — функции, декорированные через `@app.route`, обеспечивающие логику взаимодействия между пользователем и сервером;
- Data Processing — подготовка данных (при помощи Pandas);
- Plot Generation — подготовка графических объектов Vokeh;
- App Configuration — конфигурационные параметры Flask-приложения (например, пути, токены, настройки безопасности).

## 3. Источники данных и окружение.

- Radon Data Source — файл с экспериментальными данными (в формате `.dat`), который считывается при генерации графиков;
- App Configuration — обеспечивает гибкость запуска за счёт возможности переопределения параметров без модификации основного кода.

Пользователь взаимодействует с приложением через веб-интерфейс, отправляя запросы (например, выбор даты или башни), которые обрабатываются в логике маршрутов Flask. Результатом обработки может быть как полная HTML-страница (при начальной загрузке), так и обновление части интерфейса (при работе с интерактивным графиком через AJAX/JS).

Такое разделение позволяет обеспечить интерактивность без потери скорости, а также делает возможным масштабирование и расширение функциональности в будущем (например, подключение машинного обучения, реализация потоковой обработки и пр.).

### 2.3.2. Схема взаимодействия с пользователем

Запросы пользователей к приложению обрабатываются в соответствии с архитектурой WSGI (Web Server Gateway Interface), где взаимодействие между веб-сервером Apache и Python-приложением Flask организовано с помощью промежуточного слоя – модуля `mod_wsgi` (рис. 5).

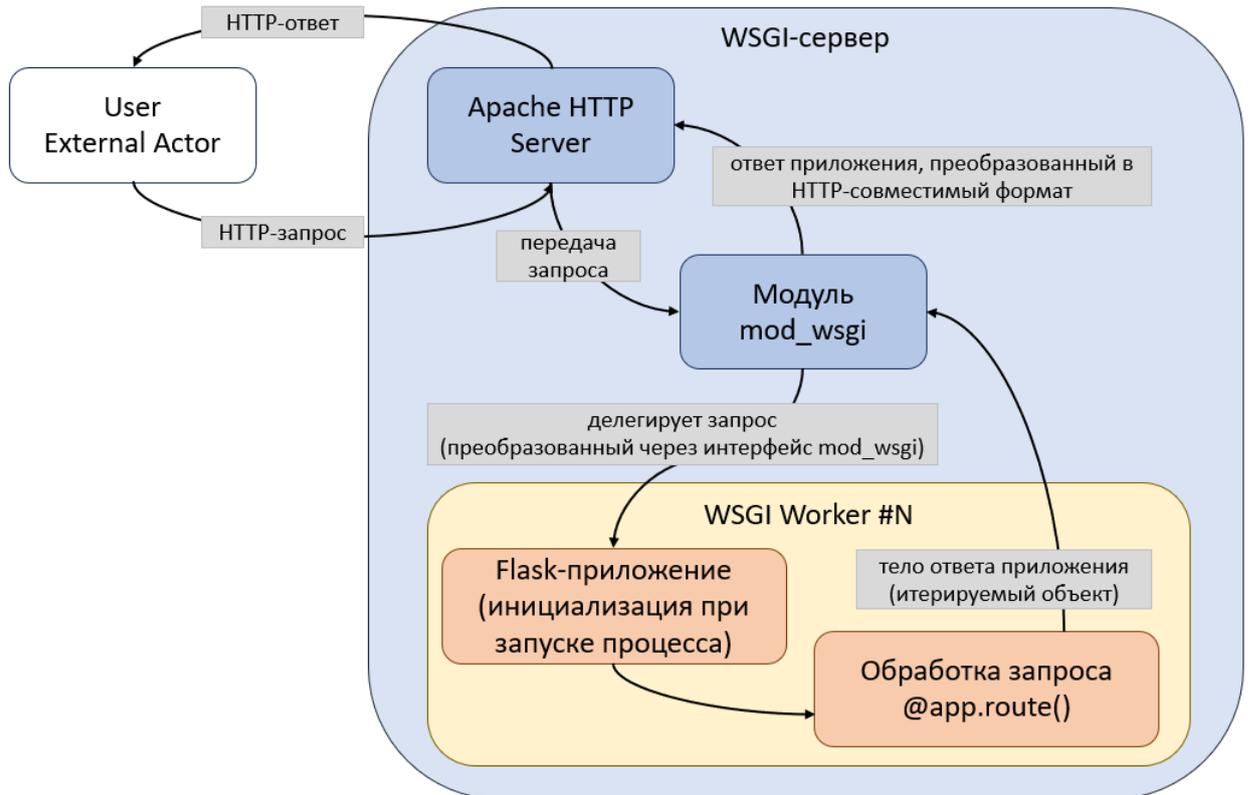


Рис.5. Схема взаимодействия между компонентами сервера и пользователем

В типичной последовательности действий клиент (браузер) отправляет HTTP-запрос к веб-серверу Apache. Далее запрос:

1. Принимается Apache и передаётся в модуль `mod_wsgi`, который представляет собой расширение для Apache, реализующее спецификацию WSGI.
2. `mod_wsgi` выступает посредником: он преобразует HTTP-запрос в формат, понятный Python-приложению, и делегирует его одному из запущенных WSGI- worker-ов.

WSGI worker – это отдельный процесс (или поток, в зависимости от конфигурации), в котором уже запущено Flask-приложение. При первом запуске worker-а происходит инициализация: загружается файл `wsgi.py`, создаётся объект Flask, подгружается конфигурация и маршруты, инициализируются модули.

3. Worker принимает запрос, сопоставляет маршрут с функцией во Flask (`@app.route`) и вызывает её, передавая входные данные.
4. Функция маршрута обрабатывает запрос и возвращает ответ в виде WSGI-совместимого итерируемого объекта (например, строки HTML или JSON).
5. Этот ответ возвращается обратно через `mod_wsgi`, где преобразуется в HTTP-совместимый формат и отсылается через Apache клиенту.

Таким образом, модуль `mod_wsgi` выполняет двустороннее преобразование:

- входящего запроса (HTTP → WSGI),
- исходящего ответа (WSGI → HTTP).

Каждый worker работает независимо от других, их количество может быть задано в конфигурации Apache. Это позволяет серверу одновременно обрабатывать несколько запросов от разных пользователей, что критически важно для повышения производительности и масштабируемости.

Следует отметить: хотя на схеме показан один worker, фактически может быть запущено несколько экземпляров Flask-приложения – каждый в своём процессе. Все они инициализируются одинаково и обслуживают входящие запросы параллельно, в зависимости от политики планировщика Apache.

### 2.3.3. Алгоритм работы

После запуска сервера и обращения пользователя к корневому маршруту, Flask-приложение формирует первоначальный ответ с помощью функции `render_template()`. В шаблон встраиваются:

- статические HTML-элементы страницы (панель управления, график, текст),
- стили оформления (CSS),
- и, что важно, JavaScript-код и компоненты визуализации, сгенерированные Bokeh с помощью функции `components()`.

На этом этапе создаётся полный HTML-документ, содержащий интерактивный график, основанный на `ColumnDataSource`, а также подключённый JS-интерфейс для управления графиком. Далее вся работа приложения реализуется в браузере, без необходимости повторной загрузки страницы.

Один из ключевых элементов архитектуры – динамическое переключение башен детектора без перерисовки страницы. Для этого используется асинхронная функция на стороне клиента:

```
// асинхронная функция для переключения башен
async function sendData(dataset) {
  const response = await fetch('/update_graph', {
    method: 'POST',
    headers: {
      'Content-Type': 'application/json',
      'X-CSRFToken': '{{ form.csrf_token() }}'
    },
    body: JSON.stringify({ dataset: dataset })
  })
  const newData = await response.json();

  const source = Bokeh.documents[0].get_model_by_name('data_source');
  source.data = newData;
  source.change.emit();
}
```

При выборе башни эта функция:

1. Отправляет AJAX-запрос на маршрут `/update_graph` методом POST.
2. На сервере этот маршрут обрабатывается функцией, которая:
  - получает идентификатор выбранной башни;
  - извлекает соответствующий временной ряд с помощью `pandas`;
  - возвращает JSON-объект, содержащий обновлённые данные.
3. Полученный JSON-документ используется для подмены содержимого `ColumnDataSource` на клиенте, без полной перерисовки графика.
4. После обновления источника данных вызывается `change.emit()`, инициирующий обновление графического отображения в браузере.

Схематически алгоритм представлен на рисунке 6.

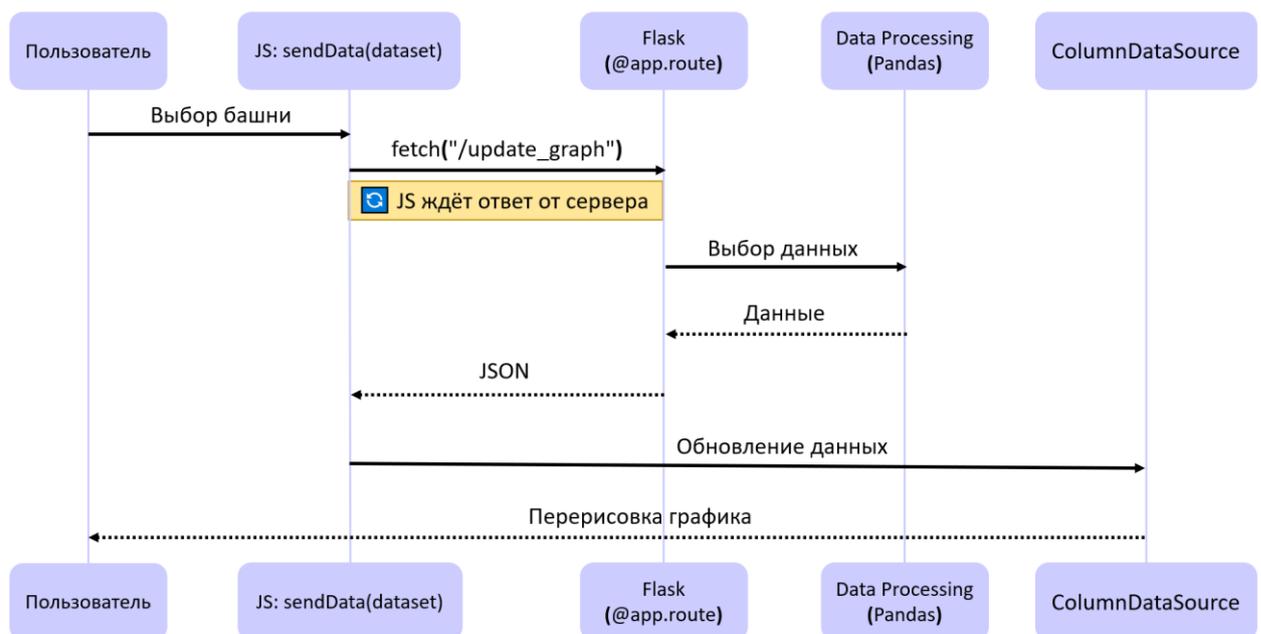


Рис.6. Диаграмма последовательностей при асинхронном обращении к серверу

Дополнительные элементы управления (масштабирование, выбор диапазона по оси X, обновление при выборе даты) реализуются через встроенные механизмы `Bokeh`. Благодаря использованию `CustomJS` (встроенного скрипта, связанного с визуальными элементами), изменение этих

параметров не требует обращения к серверу: вся логика выполняется в браузере.

Таким образом, разделение логики между сервером (данные, обработка) и клиентом (отображение, интерактивность) позволяет обеспечить высокую отзывчивость интерфейса при сохранении точности и контроля над содержимым графика.

## 2.4. Пример интерфейса пользователя

Пользовательский интерфейс представлен на рисунке 7.

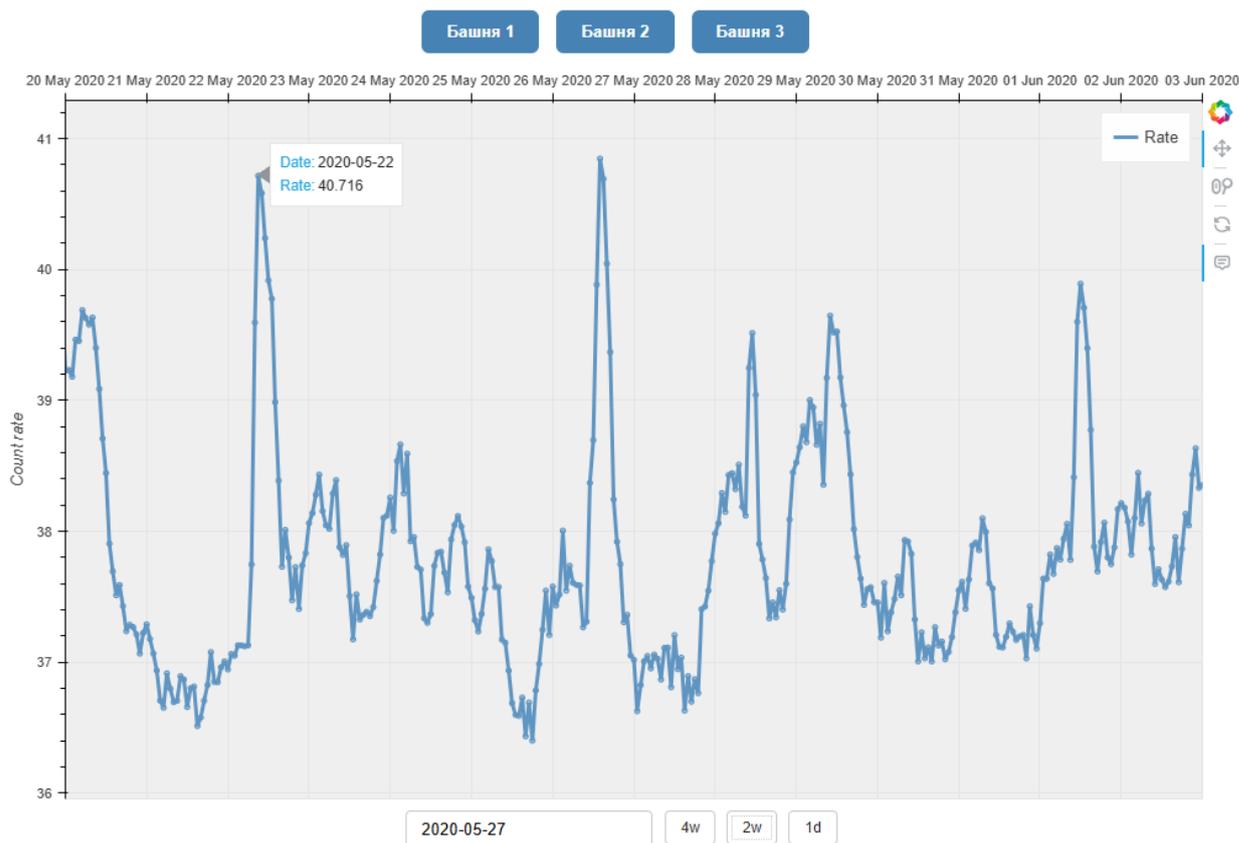


Рис.7. Пользовательский интерфейс веб-приложения

Интерфейс пользователя состоит из:

1. Интерактивного графика, позволяющего манипулировать масштабом и перемещаться по осям с использованием курсора. Помимо этого, за счёт

боковых кнопок можно сбросить приближение, а также включать или отключать возможность видеть параметры в точках при наведении на них;

2. Кнопка переключения между башнями, за счёт взаимодействия с которыми производится асинхронная перерисовка графика;
3. Поля выбора даты, при заполнении которого график автоматически центрируется относительно выбранной даты с отклонением по умолчанию 2 недели в обе стороны по шкале времени;
4. Кнопка изменения масштаба, позволяющих выбирать видимый временной (4 недели, 2 недели, 1 сутки) интервал с выбранной датой посередине.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В ходе работы был изучен детектор LVD: его предназначение, характеристики, физика экспериментальных исследований. Также были изучены особенности сбора экспериментальных данных по программе исследований вариации фоновых гамма-квантов для нахождения критериев предвестников землетрясений в центральной Италии.

Разработано первичное решение практической задачи, которое в последующем будет модифицироваться.

## Список литературы

1. Изучение вариаций низкоэнергетического фона с помощью подземного эксперимента LVD" Известия РАН Серия физическая, 2019, том 83, № 5, с. 673–675.
2. Агафонова Н.Ю. и др. "Предсказание землетрясений с помощью нейтринного телескопа LVD (Италия) под землей". Вестник РУДН. стр. 81-86, LVII Всероссийская конференция по проблемам динамики, физики частиц, физики плазмы и оптоэлектроники = LVII All-Russia Conference on Problems in Dynamics, Particle Physics, Plasma Physics and Optoelectronics: материалы конференции. Москва, РУДН, 17–21 мая 2021 г. – Москва: РУДН, 2021. – 270 с. (ISBN 978-5-209-11093-4) .
3. Агафонова Н.Ю. и др. "Отклик детектора LVD на землетрясения в центральной Италии". Известия РАН. Серия физическая Т.85, N11, 1661-1665 (2021) DOI: 10.31857/S036767652111003X [Перевод - N.Yu. Agafonova, V.V. Ashikhmin, E.A. Dobrynina, R.I. Enikeev, A.S. Malgin, O.G. Ryazhskaya, N.A. Filimonova, I.R. Shakyrianova, V.F. Yakushev, "Responses of the LVD Detector to Earthquakes in Central Italy", Bull. of the Rus. Acad. of Sci.: Physics, 2021, Vol. 85, No.11, pp.1320–1324, DOI: 10.3103/S1062873821110034].
4. Н.Ю. Агафонова, Е. А. Добрынина, Н. А. Филимонова (от имени коллаборации LVD) "Регистрация распадов радона с помощью нейтринного детектора LVD". ВМУ. Серия 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 78(1), 2310202 (2023), 4 стр. (труды конференции Ядро-2022).
5. Агафонова Н.Ю., Добрынина Е.А., Филимонова Н.А., Шакирьянова И.Р. "Отклик детектора LVD на сильные землетрясения в Средиземноморском регионе".
6. Flask <https://flask.palletsprojects.com>
7. С. Хокинс / Администрирование web-сервера Apache и руководство по электронной коммерции // Издательский дом «Вильяме», Москва, Санкт-Петербург, Киев. – 2001. – 330 С.