

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

Мониторирование 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 2024

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. Bootstrap.....	10
2.2.3. Apache.....	11
2.3. Архитектура и взаимодействия.....	11
Заключение.....	14
Список литературы.....	15

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 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).

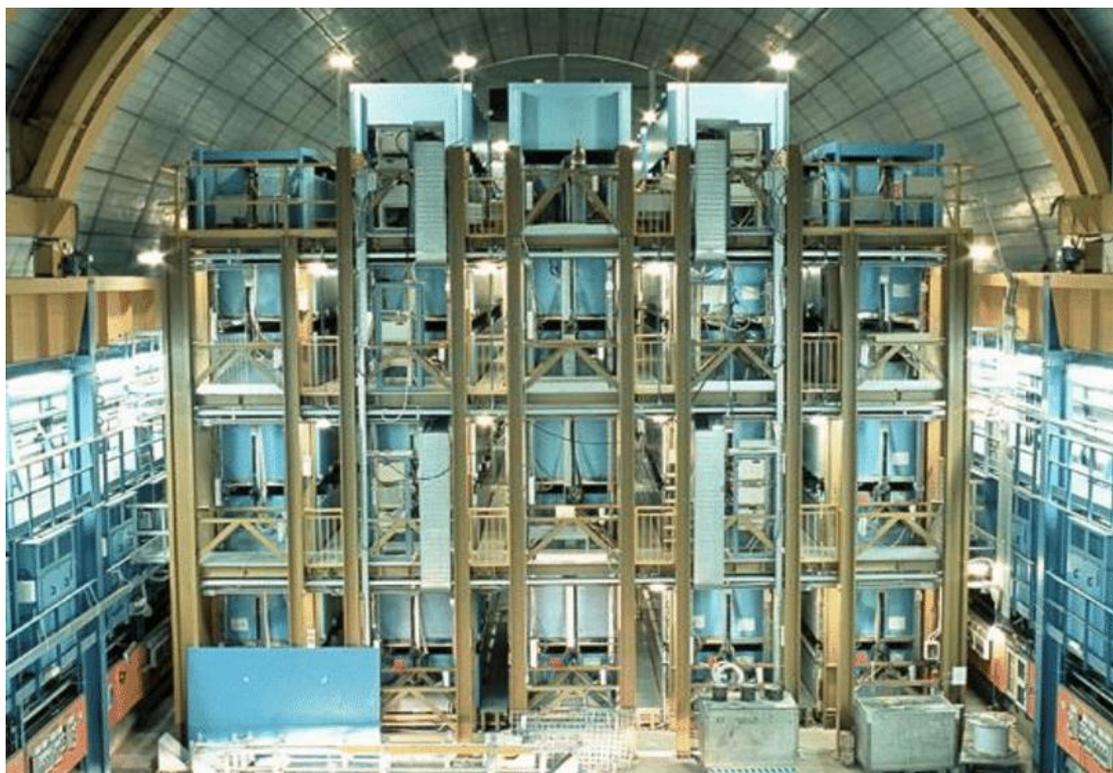


Рис. 1. Детектор LVD в лаборатории Гран-Сассо

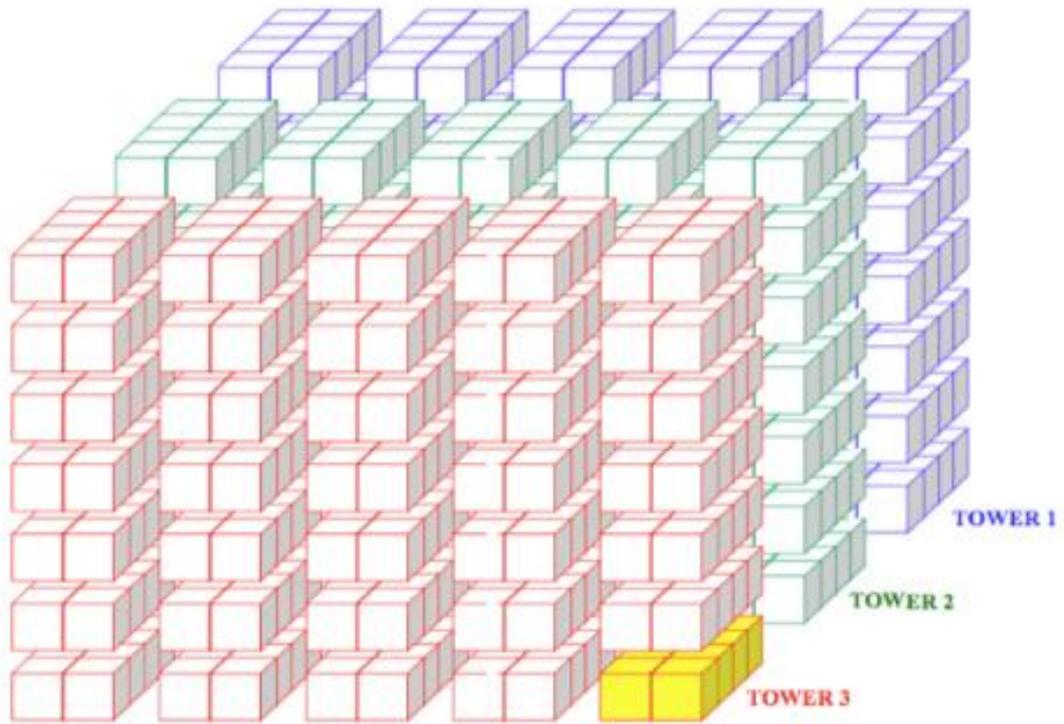


Рис. 2. Пространственная конфигурация счётчиков в составе детектора

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].

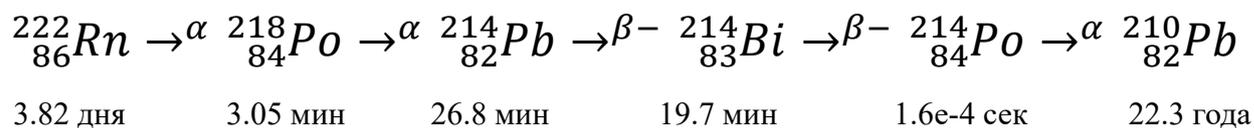
Установка LVD способна регистрировать нейтрино всех типов по реакциям взаимодействия с ядрами веществ, входящих в её структуру – водородом, углеродом, железом. Основной реакцией взаимодействия антинейтрино является обратный бета-распад (реакция ОБР): $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$, $E_e = E_\nu - 1.3$ 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: $n + {}^{56}_{26}\text{Fe} \rightarrow {}^{57}_{26}\text{Fe} + \Sigma\gamma$ ($E_\gamma \sim 7$ 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 3σ , 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 счетчика \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.

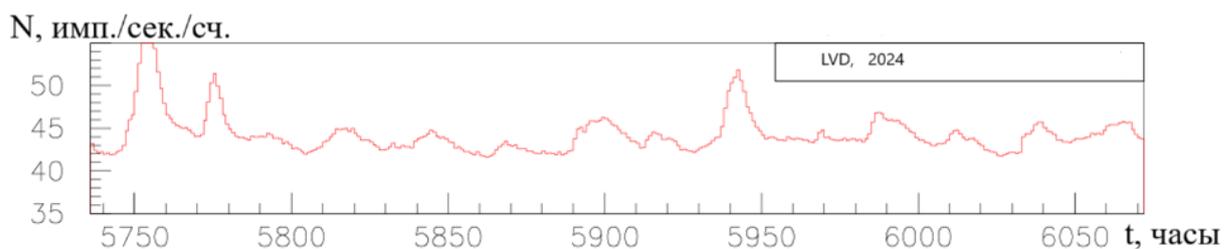


Рис.3. Пример временного ряда скорости счета гамма-квантов на LVD за 2024 год, время в часах с начала года, бин – 1 час.

Одно 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. Bootstrap

Для разработки визуальной составляющей веб-приложения был выбран Bootstrap [7]. Это фреймворк для разработки адаптивных и мобильных веб-интерфейсов. Он предоставляет готовые компоненты и стили, которые позволяют быстро создавать гибкие и функциональные пользовательские интерфейсы. Интеграция Bootstrap с приложением на Flask значительно упрощает процесс разработки и улучшает внешний вид приложения.

Bootstrap предоставляет множество готовых компонентов, таких как кнопки, формы, навигационные панели, модальные окна и карточки. Эти компоненты позволяют быстро создавать интерфейсы без необходимости писать собственный CSS.

Одним из ключевых преимуществ Bootstrap является его способность создавать адаптивные интерфейсы, которые корректно отображаются на различных устройствах – от мобильных телефонов до настольных компьютеров. Это достигается благодаря использованию сеточной системы и медиа-запросов.

2.2.3. 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. Архитектура и взаимодействия

Поскольку веб-приложение находится в стадии разработки, в качестве примера будет приведена не актуальная, а качественная структура проекта, характерная для подобных приложений (рис. 4).

```
/my_flask_project/  
├─ app/  
│   ├─ static/  
│   │   ├─ css/  
│   │   ├─ js/  
│   │   └─ images/  
│   └─ templates/  
│       ├─ base.html  
│       └─ home.html  
│   └─ __init__.py  
│   └─ routes.py  
│   └─ data_processing.py  
├─ venv/  
├─ config.py  
├─ requirements.txt  
└─ run.py
```

Рис. 4. Пример структуры Flask проекта.

Виртуальное окружение `venv/` необходимо для изоляции зависимостей и управления ими путём создания отдельной среды проекта. Это особенно важно при разработке на Python, так как разные проекты могут требовать различные версии библиотек, что может привести к конфликтам.

Директория `app/` содержит основное приложение Flask и его компоненты:

- `static/`: - здесь хранятся статические файлы CSS, JavaScript и изображения. Они обслуживаются сервером напрямую без обработки на стороне Flask. Например, стили из файла `css/style.css` могут быть подключены в HTML-шаблонах.
- `templates/`: - папка для HTML-шаблонов, использующихся для генерации динамического контента. Шаблоны обрабатываются с помощью

Jinja2. Например, файл `base.html` может содержать общую структуру страниц, а `home.html` — конкретный контент для главной страницы.

- `__init__.py`: - файл инициализирует приложение Flask, создавая экземпляр класса Flask. Он также может содержать конфигурацию приложения и регистрацию маршрутов.
- `routes.py`:- в файле определяются маршруты (URL) и функции обработки запросов. Каждый маршрут связывается с определенной функцией, которая возвращает ответ пользователю.
- `data_processing.py`: - файл может содержать функции для обработки данных.

Пользователь взаимодействует с приложением через веб-браузер:

- При загрузке страницы браузер отправляет HTTP-запрос к серверу.
- Сервер обрабатывает этот запрос и возвращает соответствующий HTML-контент.
- Пользователь может взаимодействовать с элементами страницы (например, заполнять формы), что приводит к новым запросам на сервер.

Ранее кратко приводился принцип работы сервера Apache, теперь же будет приведено описание с учётом того, как с ним взаимодействует приложение Flask:

1. Получение запросов: Apache "слушает" входящие HTTP-запросы на стандартных портах (80 для HTTP и 443 для HTTPS).
2. Передача запросов: при получении запроса Apache передает его модулю `mod_wsgi`, который обрабатывает Python-код.
3. Обработка на стороне Flask: модуль `mod_wsgi` передает запрос в приложение Flask, которое выполняет необходимые действия (например, обращается к файлам шаблонов или выполняет обработку данных).
4. Возврат ответа: после обработки запроса ответ возвращается обратно через `mod_wsgi` в Apache, который отправляет его клиенту.

Таким образом, архитектура приложения на Flask обеспечивает чёткое разделение между компонентами и эффективное взаимодействие с

пользователем через веб-сервер Apache. Это позволит создать масштабируемое и поддерживаемое веб-приложение с использованием современных технологий разработки.

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.

Кроме того, был подобран набор инструментов для разработки решения по практической задаче и начато их освоение (в том числе путём создания с помощью них тестовых версий разрабатываемого веб-приложения).

По результатам исследований был сделан доклад на XIII молодежной конференции «Физика элементарных частиц и космология 2024» (3–4 декабря 2024 г.) с названием «Мониторирование скорости счета гамма-квантов, регистрируемых в подземном детекторе LVD, с целью предсказания сильных сейсмических событий».

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. Bootstrap <https://getbootstrap.com>

8. С. Хокинс / Администрирование web-сервера Apache и руководство по электронной коммерции // Издательский дом «Вильямс», Москва, Санкт-Петербург, Киев. – 2001. – 330 С.