

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ НАРОДОВ ИМ. ПАТРИСА ЛУМУМБЫ
SCIENCE AND HIGHER EDUCATION MINISTRY OF RUSSIAN FEDERATION
PEOPLES' FRIENDSHIP UNIVERSITY OF RUSSIA NAMED AFTER PATRICE LUMUMBA

**LIX
ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПО ПРОБЛЕМАМ ДИНАМИКИ,
ФИЗИКИ ЧАСТИЦ, ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ
И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ**

Материалы конференции

Москва, РУДН, 22–26 мая 2023 г.

**LIX
ALL-RUSSIA CONFERENCE
ON PROBLEMS IN DYNAMICS,
PARTICLE PHYSICS, PLASMA PHYSICS
AND OPTOELECTRONICS**

Proceedings

Moscow, RUDN University, 22–26 May 2023

Москва
Российский университет дружбы народов
им. Патриса Лумумбы
2023

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель оргкомитета –
д.ф.-м.н., профессор *Ю.П. Рыбаков*

Заместитель председателя –
к.ф.-м.н., ассистент *Я.Н. Шаар*

Секретарь конференции –
ассистент *Н. Гоним*

Ответственный за выпуск –
к.ф.-м.н., ассистент *Я.Н. Шаар*

НАПРАВЛЕНИЯ РАБОТЫ КОНФЕРЕНЦИИ

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

Председатель – д.ф.-м.н., проф. *Р.Г. Мухарлямов*

Секретарь – асп. *И.Е. Каспирович* (kaspирович.ivan@mail.ru)

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Председатель – д.ф.-м.н., проф. *Ю.П. Рыбаков*

Секретарь – асс. *Н. В. Семенова* (dobroe_slovo@inbox.ru)

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

Председатель – д.ф.-м.н., проф. *О.Т. Лоза*

Секретарь – к.ф.-м.н., асс. *Я.Н. Шаар* (yshaar@mail.ru)

ОПТОЭЛЕКТРОНИКА И ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОПТИКА

Председатель – д.т.н., проф. *В.А. Колоцкий*

Секретарь – к.ф.-м.н., доц. *Н.Э. Николаев* (koalan@mail.ru)

ЮНЫЙ ФИЗИК-ИССЛЕДОВАТЕЛЬ

Председатель и секретарь – доц. *Н.Ю. Кравченко* (n.y.kravchenko@gmail.com)

В85 ЛIX Всероссийская конференция по проблемам динамики, физики частиц, физики плазмы и оптоэлектроники = LIX All-Russia Conference on Problems in Dynamics, Particle Physics, Plasma Physics and Optoelectronics : материалы конференции. Москва, РУДН, 22–26 мая 2023 г. – Москва : РУДН, 2023. – 343 с. : ил.

Корреляционный анализ концентрации радона, измеренного по данным LVD, и данных давления в подземной лаборатории Гран Сассо (Италия).

**Агафонова Н. Ю.¹⁾, Добрынина Е. А.¹⁾, Филимонова Н. А.^{1, 2)}
Шакирьянова И. Р.¹⁾**

¹⁾ *Институт ядерных исследований Российской Академии Наук
Россия, 117312, г. Москва, проспект 60-летия Октября, д.7а*

²⁾ *Факультет проблем физики и энергетики
Кафедра фундаментальных взаимодействий и космологии
Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)*

*Россия, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9
agafonova@inr.ru, dobrynina02@mail.ru, filimonova.na@phystech.edu, foririnas@gmail.com*

В работе представлен анализ экспериментальных данных, полученных Детектором Большого Объёма (LVD), находящимся в Лаборатории Гран-Сассо. Одной из проблем экспериментов по поиску редких событий является проблема низкоэнергетического фона в подземных помещениях. Детектор LVD регистрирует низкоэнергетичный фон от 0.5 МэВ до 20 МэВ, основная часть которого это распады от дочерних ядер радона (цепочки урана и тория). Изучается влияние на эманацию радона различных локальных эффектов: давления, а также связь с сейсмической активностью за период с 2016 по 2019 годы.

Ключевые слова: радон, нейтринный эксперимент, подземная лаборатория, корреляционный анализ.

1. Введение

Измерения низкоэнергетического фона под землёй важны для экспериментов по поиску редких событий, например, темной материи и безнейтринного бета-распада [1].

На детекторе LVD [2], находящейся в подземной лаборатории LNGS ведётся постоянный контроль фона с целью изучения вариаций концентрации радона, выходящего в атмосферу подземного помещения из горных пород перед землетрясениями. Радон образуется в грунте в результате деления и распадов элементов урановых и ториевого рядов и выходит в атмосферу подземного помещения через множественные микротрещины в породе или из воды, насыщающейся радоном (радон хорошо растворяется в воде) на пути через скальную породу до подземного зала. Поскольку количество микротрещин увеличивается при деформациях земной коры перед землетрясениями, то усиливается и испускание радона.

2. Экспериментальные данные детектора большого объёма LVD

Детектор Большого Объёма – LVD (Large Volume Detector) [3] находится в подземной лаборатории Гран Сассо (LNGS, Италия) на глубине 3650 м в.э. Проект LVD был разработан совместно сотрудниками Института ядерных исследований РАН и Института космогеофизики Италии. LVD состоит из 840 полуторакубовых

счётчиков, заполненных жидким сцинтиллятором на основе уайт-спирита. Геометрический объем установки $22.7 \times 13.2 \times 10 \text{ м}^3$.

Главная задача LVD – регистрация нейтринных вспышек от коллапсирующих звёзд. Основная реакция взаимодействия нейтрино в детекторе – это реакция обратного бета распада (взаимодействие с протонами сцинтиллятора). Преимущество LVD перед большими водяными детекторами заключается в наличии углерода в сцинтилляторе и железных конструкций и опор детектора, что позволяет регистрировать как электронные антинейтрино, так и мюонные и тау-нейтрино, и антинейтрино и поэтому разделять разные типы нейтрино.

Основой поиска нейтринных всплесков является идентификация кластеров событий с низкой вероятностью имитации событий за счёт флуктуации фона. В течение 31 года поиска таких кластеров на LVD, т. е. наблюдений гравитационных коллапсов, в том числе скрытых (без сброса оболочки), в Галактике и Магеллановых Облаках не обнаружено. По данным работы нейтринного телескопа LVD работы с 1992 по 2023, получено экспериментальное ограничение на частоту нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёзд в Галактике: менее 1 события за 13.46 г. на 90% уровне достоверности.

Фоном детектора LVD являются атмосферные мюоны (средняя энергия которых около 280 ГэВ, скорость счета мюонов на одну башню $\sim 120 \text{ ч}^{-1}$) и естественная радиоактивность под землёй.

Установка LVD регистрирует гамма-кванты от распадов дочерних ядер радона [2], период полураспада которого 3.8 дня.

Гамма-излучение создаётся, в основном, ядрами висмута, за счёт бета-распада превращающимися в полоний с характерным временем 19.7 мин. Энергетический спектр гамма-излучения охватывает диапазон от 0.6 до 2.5 МэВ. Импульсы LVD выше нижнего порога мы здесь и далее будем называть «радоновыми данными LVD». Скорость этих импульсов измеряется каждые 10 минут для стабильно работающих внутренних счётчиков детектора. Среднее значение скорости счета для первой башни 45 импульсов в секунду на один счётчик.

Установка LVD может наблюдать выбросы радона, связанные с сейсмической активностью в регионе [4]. Эти исследования могут помочь геофизикам, быть ещё одним инструментом, для успехов в предсказании разрушительных землетрясений.

Для разработки методики поиска корреляций данных LVD и землетрясений в итальянском регионе проведён анализ данных темпа счета установки с 2016 по 2019 года. Собраны базы по атмосферному давлению и сейсмической активности за тот же период времени.

3. Данные сейсмической активности

Как только происходит землетрясение, сейсмические сигналы, которые оно производит, регистрируются Национальной сейсмической сетью и немедленно анализируются дежурным персоналом, 24 часа в сутки, в сейсмической офисе INGV в Риме. Местонахождение землетрясения определяется путём вычисления географических координат и глубины, а его сила оценивается с помощью магнитуды Рихтера (местная величина ML). Для каждого землетрясения создаётся информационная страница со всей доступной информацией. Эти страницы могут быть изменены, как только появятся новые данные. Данные других местных, региональных и национальных сейсмических сетей, принадлежащих другим итальянским или зарубежным учреждениям, которые собираются в режиме

реального времени сейсмическом офисе INGV, также способствуют локализации сейсмических событий.

Сейсмический офис INGV в Риме фиксирует все землетрясения, даже самые слабые, которые происходят на территории страны и в морях, окружающих Италию. О сейсмических событиях магнитудой $\geq 2,5$ необходимо уведомлять население посредством связи в Департамент гражданской защиты (ДГЗ) и население через Интернет. Согласно Рамочному соглашению с DPC, INGV также должен сообщать о землетрясениях магнитудой $\geq 5,0$ в Средиземноморье и о землетрясениях магнитудой $\geq 6,0$ в остальном мире.

Параметры, определяющие землетрясение, – это время возникновения, гипоцентр (географические координаты и глубина) и магнитуда. Мы в исследовании также будем привлекать другие параметры землетрясений: интенсивность, сейсмический момент и энергию.

Используемые формулы:

1. Перевод магнитуды (M) в энергию (E):

$$\begin{aligned} \lg E \text{ (эрг)} &= 1,5M + 11,8 \\ E \text{ (эрг)} &= 10^{1,5M+11,8} \\ E &= 10^{16} \text{ Дж} = 10^{23} \text{ эрг} \end{aligned} \quad (1)$$

2. Интенсивность землетрясения (I), зависит от магнитуды (M) и от глубины (H) и расстояния то эпицентра (R) землетрясения:

$$I = 3 + 1,5M - 3,5 * \lg(\sqrt{H^2 + R^2}) \quad (2)$$

4. Корреляционные функции радоновых данных LVD, атмосферного давления и землетрясений

По данным с детектора LVD в промежутке с 2016 по 2019 годы был проведён корреляционный анализ данных по низкоэнергетическому порогу детектора (радоновые данные, Rn) с магнитудой, энергией и интенсивностью землетрясений.

Корреляционный анализ проводился с использованием средств библиотеки SciPy, Python. Вычислялись корреляционные функции $c_k(t)$ по формуле

$$c_k = \sum a_{n+k} \bar{v}_n, \quad (3)$$

где a и v – последовательности данных, которые мы подаём на вход; \bar{x} – обозначает комплексное сопряжение.

Графики корреляционных функций показаны на рис. 1. Результаты корреляционного анализа показывают отсутствие корреляции с магнитудой и энергией. Однако на графике Rn-Intensity виден рост корреляции данных в области предсказания землетрясений. Постепенное повышение корреляции с пиком в нуле – то есть максимальная корреляция день в день.

Для радоновых данных LVD CR_{LVD} и данных атмосферного давления P также проведён корреляционный анализ с использованием средств библиотеки SciPy, Python (рис. 2). Найден минимум коэффициента корреляции $c_k(t) [P, CR_{LVD}] = -0.57$ в точке $t = -41$ час. Что говорит о том, что изменение атмосферного давления влечёт за собой изменение скорости счета радоновых данных LVD через 41 час.

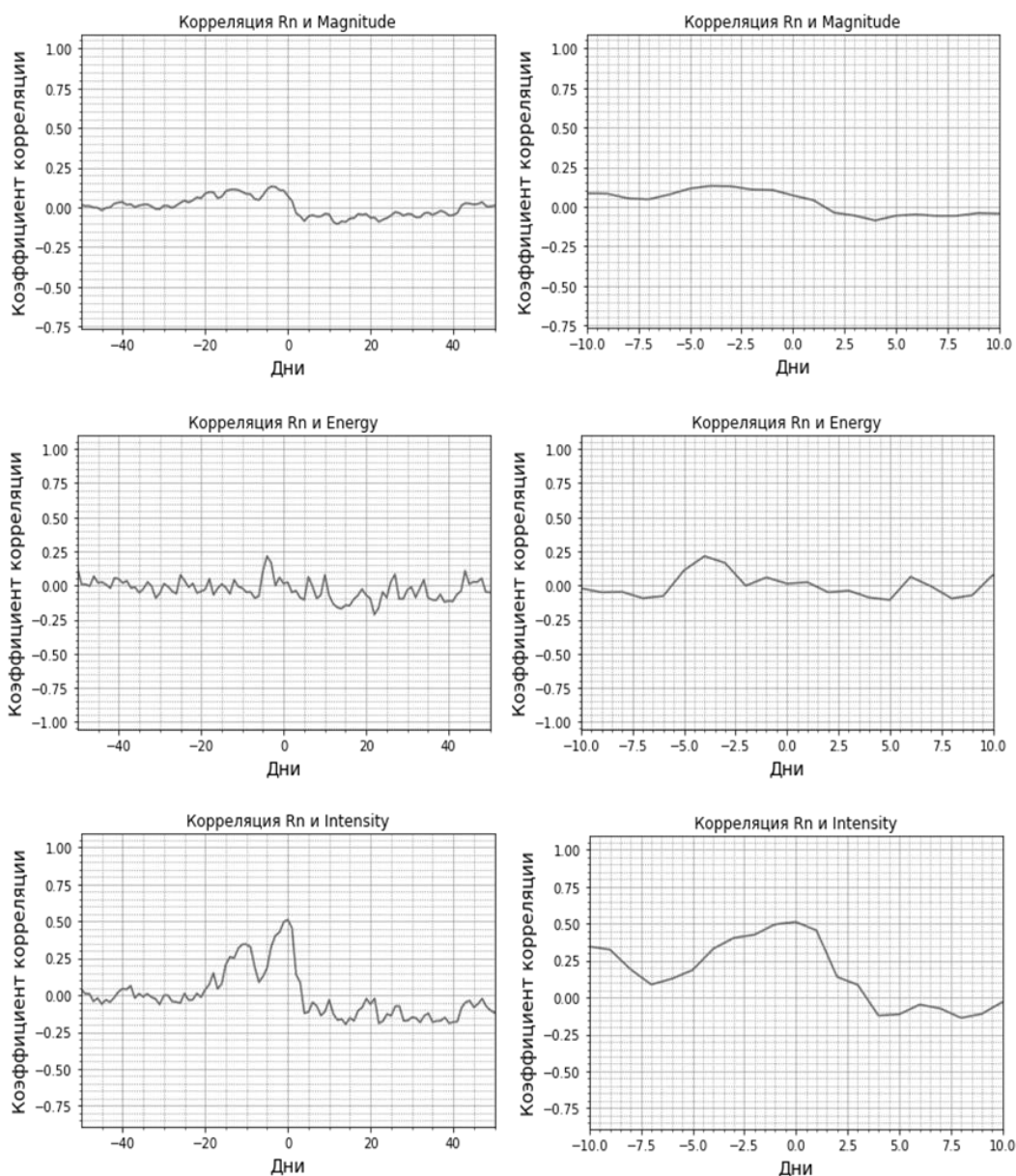


Рис. 1. Корреляционные функции сейсмической активности и темпа счета установки. а) корреляция радоновых данных с магнитудой землетрясений. - б) корреляция радоновых данных с энергией землетрясений, в) корреляция радоновых данных с интенсивностью землетрясений. Пары рисунков отличаются временным диапазоном.

5. Временные ряды радоновых данных LVD и давления

На рис. 3 показан ход величины атмосферного давления и ход величины скорости счета CR_{LVD} за период с 2016 по 2020 годы [5]. На поведении кривых можно увидеть антикорреляцию, а в выделенном эллипсе сильную антикорреляцию. Эти зависимости имеют не сезонный характер. Мы предполагаем, что изменение величины атмосферного давления влияет на плавный тренд выхода радона и будем пытаться найти более чёткие характеристики этой зависимости. В то же время резкие выбросы в данных LVD, связанные с аномальным поведением радоновых полей, являются предметом дальнейших исследований.

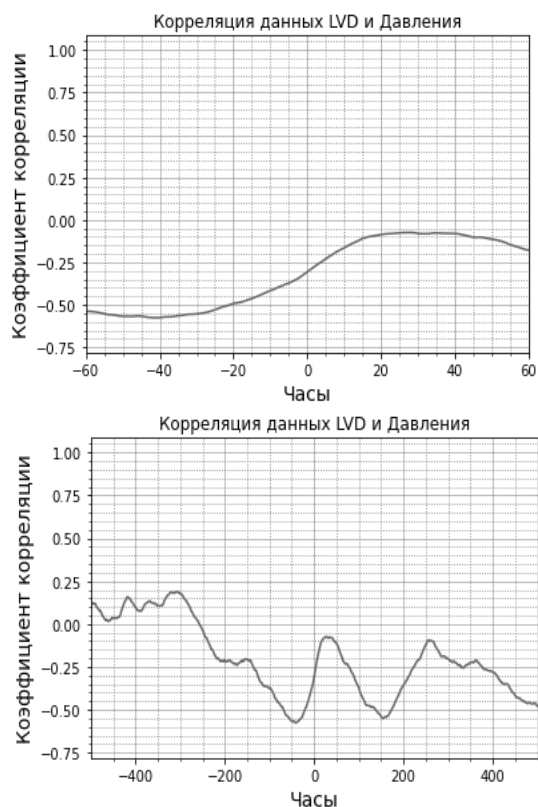


Рис. 2. Корреляционные функции атмосферного давления и радоновых данных установки LVD.

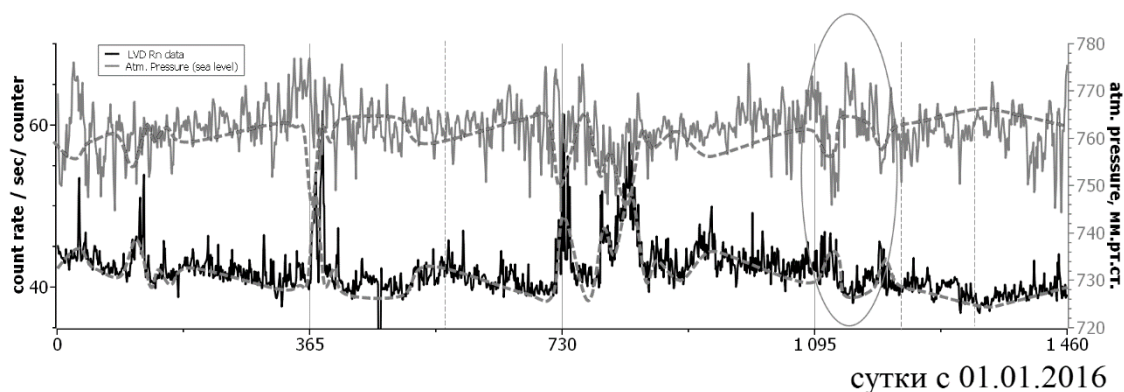


Рис. 3. Временные ряды величины атмосферного давления (серая гистограмма) и величины скорости счета радоновых импульсов CR_{LVD} (черная гистограмма) за период с 2016 по 2020 годы.

6. Заключение

Результаты проведённого корреляционного анализа радоновых данных установки говорят о возможном наличии зависимости темпа счета установки с интенсивностью Землетрясений. Результаты корреляционного анализа радоновых данных установки показывают наличие антикорреляции с давлением с коэффициентом -0.57 в точке -41 час. Что говорит о том, что изменение

атмосферного давления влечёт за собой изменение скорости счета радоновых данных LVD через 41 час.

Исследование выполнено частично за счёт гранта Российского научного фонда №23-22-00048, <https://rscf.ru/project/23-22-00048/>.

Литература

- [1] *Haffke M., Baudis L., Bruch T., Ferella A.D., Marrodán Undagoitia T., Schumann M., Te Y.-F., van der Schaaf A.* // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment – 2011. – V.643, Issue 1. – P. 36-41.
- [2] *Агафонова Н.Ю., Алексеев В.А., Добрынина Е.А. и др.* // Препринт № 1071/2001 ИЯИ РАН, 2001.
- [3] *Vari, G. et al.* // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A. –1988. –V. 264. – P. 5.
- [4] *Агафонова Н.Ю., Ашихмин В.В., Добрынина Е.А., Еникеев Р.И., Мальгин А.С., Рязжская О.Г., Шакирьянова И.Р., Якушев В.Ф. (от имени Коллаборации LVD)* // Яд. Физ. 81, № 1, 85 (2018) [Phys. Atom. Nucl. 81, 95 (2018)].
- [5] *Н. Ю. Агафонова, В. В. Ашихмин, Е. А. Добрынина и др.* // Известия РАН. Сер. Физ. – 2023 (в печати)

Correlation analysis of radon concentration measured from LVD data and pressure data in the Gran Sasso underground laboratory (Italy).

**Agafonova N. Yu.¹⁾, Dobrynina E. A.¹⁾, Ryazhskaya O. G.¹⁾
Filimonova N. A.^{1,2)}**

¹⁾ *Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences Russia,
117312, Moscow, prospect 60-letiya Oktyabrya, 7a*

²⁾ *Faculty of Physics and Power Engineering
Department of Fundamental Interactions and Cosmology
Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)
Russia, 141701, Moscow Region, Dolgoprudny, Institutskiy per., 9*

agafonova@inr.ru, dobrynina02@mail.ru, filimonova.na@phystech.edu, foririnas@gmail.com

This paper presents an analysis of experimental data obtained by the Large Volume Detector (LVD) located at the Gran Sasso Laboratory. One of the problems of experiments to search for rare events is the problem of low-energy background in underground rooms. The LVD detector registers a low-energy background from 0.5 MeV to 20 MeV, the main part of which is decays from radon daughter nuclei (uranium and thorium chains). The influence of various local effects on radon emanation is studied: pressure, as well as the connection with seismic activity for the period from 2016 to 2019.

Key words and phrases: neutrinos, underground physics, radioactivity, radon, seismic activity, earthquake precursors.