

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.

Отклик детектора LVD на сильные землетрясения в Средиземноморском регионе

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 представлены экспериментальные данные нейтринного детектора LVD (Италия), которые показывают изменение концентрации газа радон в подземном зале. Мы показываем временные ряды импульсов детектора в период сильных землетрясений 2016, 2019 и 2023 годов в Итальянском регионе и региона Средиземноморья.

Ключевые слова: радон, предвестники землетрясений, подземная лаборатория.

1. Введение

Естественный радиоактивный газ радон является продуктом распада радия, который, в свою очередь, появился в результате распада урана-238. Из-за своих особенностей радон является одним из индикаторов при различных геологических исследованиях.

Радон непрерывно генерируется в горных породах в процессе радиоактивного распада, то есть всегда присутствует в любом горном массиве, и уменьшение его концентрации происходит: а) за счёт распада (период полураспада радона равен 3,825 дня), б) за счёт миграции из массива в воздух. Однако же новая генерация газа появляется из цепочки распадов урана. Поэтому среднее содержание радона в грунте всегда постоянно и определяется концентрацией урана (радия) в этом массиве. Миграция радона в горном массиве и его выделение с поверхности определяются макроскопическим коэффициентом диффузии, который зависит от многих факторов. Наиболее важными из них являются пористость, проницаемость и трещиноватость.

Некоторые исследования показывают связь аномальных выбросов радона перед крупными землетрясениями и отражает деформацию земной коры [1, 2, 3].

Радиоактивная природа радона делает его мощным индикатором движения земной коры и потенциально эффективным маркером для изучения процессов, связанных с подготовительной фазой землетрясений.

2. Детектор большого объема LVD

Детектор Большого Объема – LVD (Large Volume Detector) [4] находится в подземной лаборатории Гран Сассо (LNGS, Италия) на глубине 3650 м в.э. Главная задача LVD – регистрация нейтринных вспышек от коллапсирующих звезд.

Основная реакция взаимодействия нейтрино в детекторе – это реакция обратного бета распада: $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$, с пороговой энергией $E_{\text{NET}}=4$ МэВ. Нейтрон может быть идентифицирован посредством регистрации гамма-кванта с энергией (E_{LET}) больше 0.4 МэВ от взаимодействия n с протоном или ядром железа: $n + p \rightarrow d + \gamma$, $n + \text{Fe} \rightarrow \text{Fe} + \Sigma\gamma$.

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

Установка LVD регистрирует гамма-кванты от распадов дочерних ядер радона, с периодом полураспада 3.8 дня, в основном это гамма от висмута ^{214}Bi ($\tau=19.7$ мин), энергетический спектр которых от 0.6 до 2.5 МэВ. Переменная часть темпа счета LVD выше нижнего порога коррелирует с вариациями концентрации радона в подземном помещении. Быстрые изменения этой составляющей мы называем «радоновыми пиками LVD». Скорость счета этих импульсов измеряется каждые 10 минут для стабильно работающих внутренних счетчиков детектора [5].

Установка LVD может наблюдать выбросы радона, связанные с техногенной деятельностью (микротряской) и сейсмической активностью в регионе [6]. Эти исследования могут стать ещё одним инструментом для создания общей системы наблюдения и помочь геофизикам в прогнозе разрушительных землетрясений.

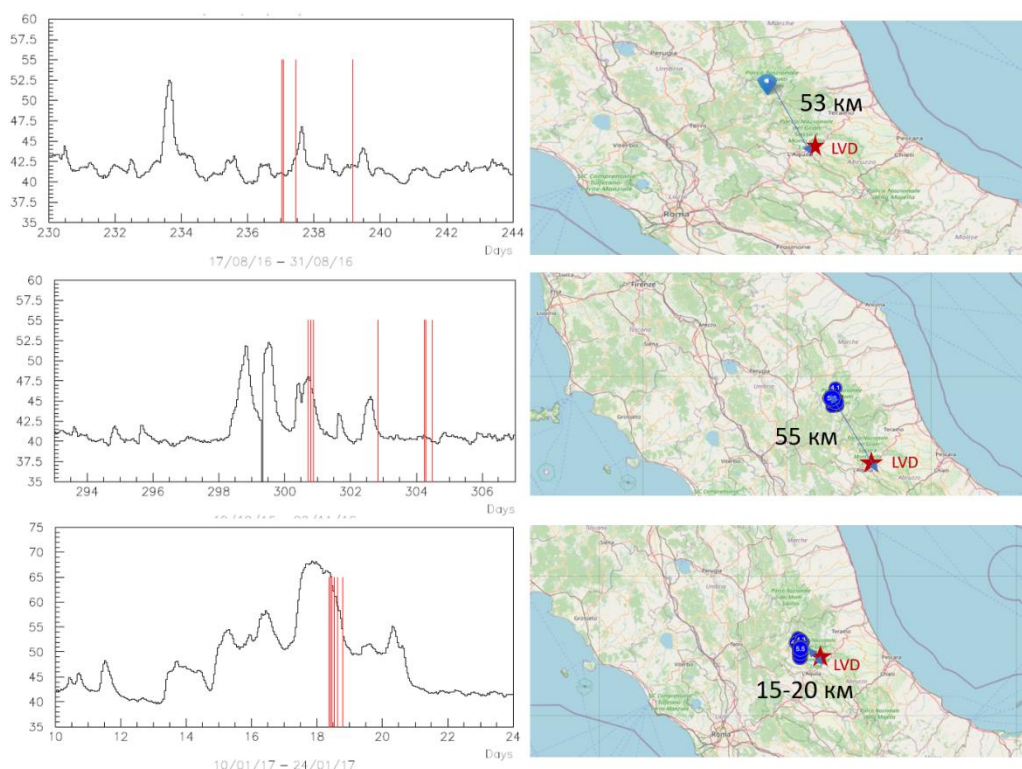


Рис. 1. Отклик установки LVD на землетрясение а) – 24 августа 2016 г Аккумоли, Норча, Италия (03ч36м M=6.0); б) – 26-30 октября 2016 г Норча, Мачерата, Италия (07ч40м M=6.5), Аквила, Италия (04ч37м M=4.5); в) 18 января 2016 г Барете, Капитиньяно, Италия (11ч14м M=5.5, 14ч33м M=5.0)

3. Землетрясения 2016 года

В 2016 г. в Италии было много сильных разрушительных землетрясений с эпицентром около городов Норча, Акумоли, Амастриче. Эти землетрясения

почувствовали в центральных регионах Италии – Лацио, Марке, Абруццо. На рис. 1 показан отклик детектора LVD (временные ряды радоновых импульсов), красными линиями показаны моменты сильных толчков с магнитудой больше 4. Пики во временных рядах LVD, превышающие 50 имп./с/сч видны за несколько суток (1-2) на рис. 1а, б. Землетрясение произошедшее рядом с установкой, в 15-20 км, дало отклик в виде горба с амплитудой 70 имп./с/сч при среднем минимальном значении около 41 имп./с/сч.

Информацию о землетрясении, его координаты и магнитуду можно взять с сайта Национального института Геофизики и Вулканологии Италии [7].

4. Землетрясения 2019 года

Общий уровень средних значений скорости счета радоновых импульсов начиная с конца 2019 года был понижен из-за ограничений, связанных с пандемией Ковид-19. Почти не ездили машины по транспортному туннелю, не ходили на работу сотрудники в обычном режиме. Сейсмическая обстановка была достаточно спокойная. Землетрясения с магнитудой >4.4 произошли достаточно далеко от детектора. Небольшие пики, до 43 имп./с/сч, наблюдались также за 1-3 суток, которые можно связать с землетрясениями в Албании и Боснии и Герцеговине, однако они слабо выделяются над переменным фоном LVD (Рис. 2).

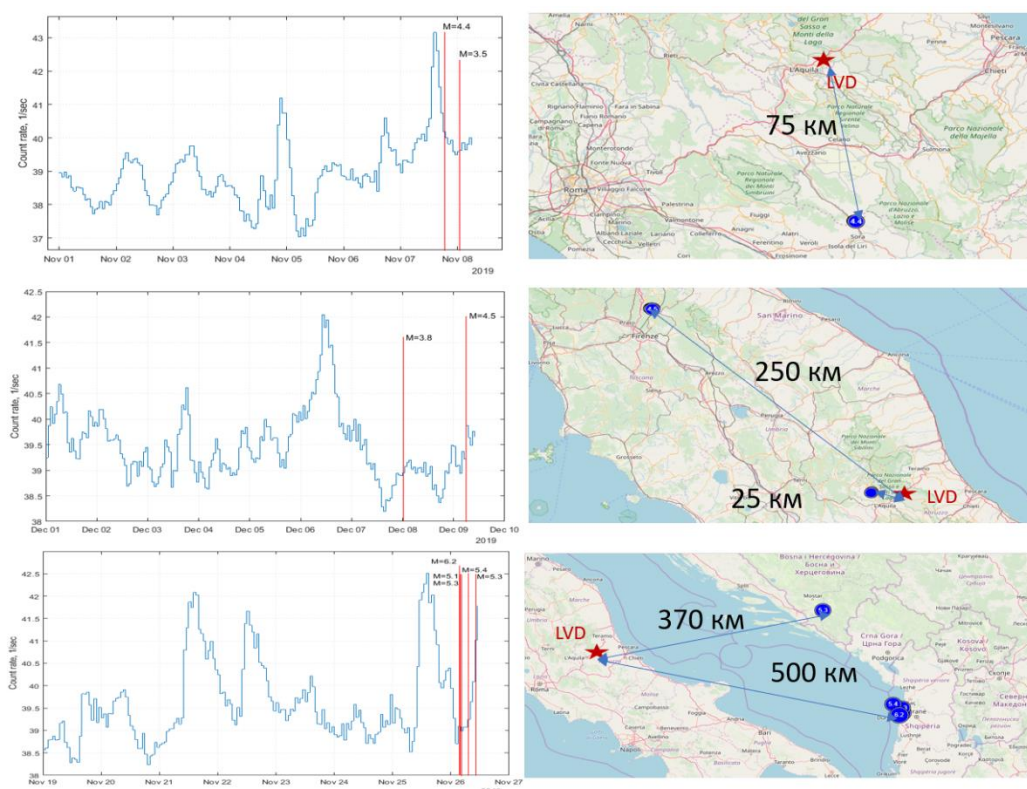


Рис. 2. Отклик установки LVD на землетрясение а) – 07 ноября 2019 г Бальсорано, Италия (17ч35м M=4.4); б) – 08-09 декабря 2019 г Барете (23ч16м M=3.8), Скарперия и СанПьетро, Италия (04ч37м M=4.5); в) 26 декабря 2019 г Албания (02ч54м M=6.2), Босния и Герцеговина (09ч19м M=5.3)

5. Землетрясения 2023 года

06 февраля 2023 года произошло сильнейшее землетрясение в Турции, самый мощный толчок был с магнитудой 7.9. Отклик LVD показан на рис. 3. За неделю до землетрясения был зарегистрирован увеличенный выход радона из грунта, пики в данных до 48 имп./сч были за 4 дня до землетрясения.

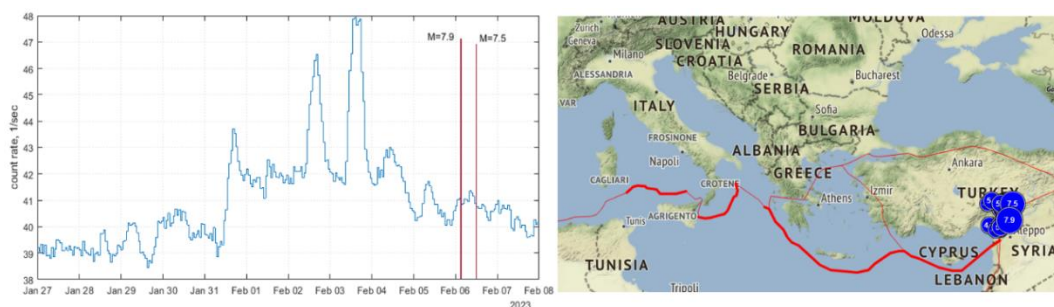


Рис. 3. Отклик установки LVD на землетрясение в Турции 06 февраля 2023 г (01ч17м M=7.9, 10ч24м M=7.5, >25 толчков с M = 4 – 5).

6. Заключение

К сожалению, многие теории, описывающие механизмы землетрясений, не рассматривают процесс подготовки события и соответственно способы его прогноза. Говоря о прогнозе землетрясения, необходимо помнить, что он должен выявлять три параметра будущего события: 1) координаты эпицентра, 2) время, 3) магнитуду. Соответственно должны быть указаны погрешности измерения этих величин.

Связь между напряжённым состоянием горных пород и вариациями выделения радона была предложена и подтверждена несколькими лабораторными экспериментами, например [8]. С использованием LVD на статистике более чем 25 лет, а также принимая во внимание точность в определении изменений концентрации радона, мы пытаемся не только визуально проверить временные ряды концентрации радона, которые могут обеспечить некоторые наблюдения первого порядка за характеристиками эманации радона, но обнаружить более тонкие изменения во временных рядах в целях прогнозирования землетрясений.

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

Литература

- [1] *Yasuoka Y.* The anomaly in atmospheric radon concentrations prior to the 2011 Tohoku-Oki earthquake in Japan / Y Yasuoka., H. Nagahama, J. Muto, T. Mukai // *Radiat. Environ. Med.* – 2018. – V. 7. – P. 86–94.
- [2] *Iwata D.* Non-parametric detection of atmospheric radon concentration anomalies related to earthquakes. / D. Iwata, H. Nagahama, J. Muto, Y. Yasuoka // *Sci. Rep.* – 2018. – V. 8. – P. 13028.

- [3] *Soldati G.* Monitoring soil radon during the 2016–2017 central Italy sequence in light of seismicity / G. Soldati, V. Cannelli, A. Piersanti // *Sci Rep* – 2020. – V. 10. – P. 13137.
- [4] *Bari G. et al.* // *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A.* –1988. –V. 264. – P. 5.
- [5] *Агафонова Н. Ю.* Изучение вариаций концентрации радона под землей с помощью установки LVD / Н.Ю. Агафонова, В.А. Алексеев, Е.А. Добрынина, В.В. Кузнецов, А.С. Мальгин, О.Г. Рязская, В.Ф. Якушев В.Ф. // Препринт ИЯИ РАН – 2001. – № 1071/200.
- [6] *Агафонова Н. Ю.* Регистрация распадов радона с помощью нейтринного детектора LVD / Н.Ю. Агафонова, Е.А. Добрынина, Н.А. Филимонова (от имени коллаборации LVD) // ВМУ. Серия 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ – 2023. – V. 78(1). – P. 2310202.
- [7] <http://terremoti.ingv.it/>
- [8] *Tuccimei P.* Radon and thoron emission from lithophysae-rich tuff under increasing deformation: An experimental study / P. Tuccimei, S. Mollo, S. Vinciguerra, M. Castelluccio, M. Soligo // *Geophys. Res. Lett.* – 2010. – V. 37. – P. L05305.

Response of the LVD set up to strong earthquakes in the Mediterranean region.

**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: radon, earthquake precursors, underground laboratory.