

LXXII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ЯДРО–2022:
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ПРИЛОЖЕНИЯ

ЯДЕРНО–ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ В МЕДИЦИНЕ, РАДИАЦИОННАЯ ЭКОЛОГИЯ

Регистрация распадов радона с помощью нейтринного детектора LVDН. Ю. Агафонова,^{1,а} Е. А. Добрынина,^{1,б} Н. А. Филимонова,^{1,2} (от имени коллаборации LVD)¹ Институт ядерных исследований РАН. Россия, 117312, Москва, пр-т 60 летия Октября, 7а² Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет)
Россия, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Поступила в редакцию 28.09.2022, после доработки 20.10.2022, принята к публикации 24.10.2022.

Детектор большого объема LVD, находящийся в низкофоновой лаборатории Гран–Сассо, Италия, создан для регистрации нейтрино от коллапсов звездных ядер в нашей Галактике. Особенность поиска редких событий требует пристального внимания к фону эксперимента, такому как естественная радиоактивность грунта и материалов детектора и взаимодействие мюонов космических лучей под землей. Установка LVD способна регистрировать гамма–кванты от распадов дочерних ядер радона. Мы убедительно показываем связь изменения скорости счета фоновых импульсов от гамма–квантов в детекторе с изменением концентрации ядер радона в экспериментальном зале. Мы также указываем на существование еще одного источника изменения концентрации радона — сейсмоактивность.

Ключевые слова: радиоактивные распады, радон, сцинтилляционные методы.

УДК: 539.16, 550.348.43. PACS: 23.40.-S, 29.40.Mc, 91.30.-f.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.78.2310202](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.78.2310202)**ВВЕДЕНИЕ**

В настоящей работе представлена методика регистрации распадов радона в грунте с помощью сцинтилляционного детектора большого объема LVD [?]. Вариации радиоактивного фона являются важным предметом исследований для экспериментов по регистрации редких событий, таких как темная материя, безнейтринный двойной бета-распад, нейтрино от Солнца и нейтрино от вспышек Сверхновых.

В подземной лаборатории Гран–Сассо (LNGS, INFN, центральная Италия), расположенной на средней глубине 3650 м в.э., в транспортном туннеле сооружены три больших зала (A, B, C) для ядерно-физических экспериментов. Зал A эксперимента LVD имеет объём 24000 м³, из них около 2000 м³ занимает оборудование. Ввоз и вывоз оборудования производится через двое ворот. При закрытых воротах и заблокированных затворах принудительной вентиляции зал практически герметичен в смысле его сообщения с атмосферой других помещений. Приток свежего воздуха идёт из долины Терамо, содержание радона в котором незначительно. Вентиляция по требованиям техники безопасности работает постоянно и выключается только по технической необходимости.

Грунт Гран–Сассо, бетон, а также все детекторы и вспомогательные материалы любой экспериментальной установки содержат радиоактивные изотопы, излучающие гамма–кванты с очень длительным периодом полураспада: ²³⁸U ($T_{1/2} = 4.5 \times 10^9$ лет), ²³²Th ($T_{1/2} = 1.4 \times 10^{10}$ лет) и ⁴⁰K ($T_{1/2} = 1.3 \times 10^9$ лет).

Гамма–активность первичных изотопов, определенная по измерениям с помощью 3-дюймового детектора NaI(Tl) [?], составляет в зале A: 11.7 ± 3.9 Бк/кг для ²³⁸U, 14.8 ± 2.8 Бк/кг для ²³²Th, и 62 ± 14 Бк/кг для ⁴⁰K. Для зала A основной вклад в фоновую радиоактивность вносит бетон, в то время как в середине установки LVD излучение от бетона экранируется конструкцией LVD (1.2 ± 0.4 , 0.34 ± 0.07 , 1.04 ± 0.32 соответственно для U, Th, K). Здесь радиоактивность исходит от железных конструкций и ФЭУ детектора.

Об уровне гамма–фона в лаборатории LNGS опубликовано несколько работ: интегральный поток гамма–излучения в зале C составил $\Phi_C \sim 1 \text{ с}^{-1}\text{см}^{-2}$ [?], в зале A измеренный поток ниже 3000 кэВ составил $\Phi_A \sim 0.73 \text{ с}^{-1}\text{см}^{-2}$ [? ?].

Продукт распада ²³⁸U, газ ²²²Rn, также вносит свой вклад в естественный фон радиоактивности в подземных лабораториях, поскольку он исходит из множественных микротрещин в породе или выходит из воды, насыщающейся радоном на пути через скальную породу и может довольно легко проникать в детектор. Целью работы является продемонстрировать, что изменение фона детектора LVD связано с изменением концентрации газа радона в подземном зале.

1. ОПИСАНИЕ ДЕТЕКТОРА LVD И МЕТОДИКА РЕГИСТРАЦИИ

Детектор LVD (Large Volume Detector), находящийся в зале A лаборатории Гран–Сассо, специально сконструирован для регистрации нейтрино от коллапсов звездных ядер в нашей Галактике [?]. LVD имеет два порога регистрации: триггерный — 4 МэВ для регистрации позитронов от реакции обратного бета распада, и низкоэнергетичный — 0.5 МэВ для

^а E-mail: agafonova@inr.ru^б E-mail: dobrynina@inr.ru

регистрации гамма-квантов от захвата нейтронов ядрами мишени установки.

LVD содержит 1000 т жидкостного сцинтиллятора, заполняющего 840 счётчиков объёмом 1.5 м^3 каждый. Счётчик имеет форму параллелепипеда ($100 \times 100 \times 150 \text{ см}^3$), сделан из нержавеющей стали. На верхней его грани установлены три фотоумножителя, включённые на совпадение. Счётчики помещены по 8 штук в металлические модули контейнеры (портатанки), из которых набираются вертикальные колонны. Пять колонн из 7 портатанков объединяются в башню, таким образом, одна башня содержит 35 модулей с 280 счётчиками.

Установка LVD может регистрировать гамма-кванты от распадов дочерних ядер радона ^{222}Rn , период полураспада которого 3.8 дня. Наиболее вероятна следующая цепочка радиоактивных распадов: $^{222}\text{Rn} \rightarrow ^{218}\text{Po} \rightarrow ^{214}\text{Pb} \rightarrow ^{214}\text{Bi} \rightarrow ^{214}\text{Po} \rightarrow ^{210}\text{Pb}$.

Гамма-излучение создаётся в основном ядрами ^{214}Bi , за счёт β -распада превращающимися в ^{214}Po с характерным временем $\tau = 19.7$ мин. Энергетический спектр гамма-излучения охватывает диапазон от 0.6 до 2.5 МэВ.

Система регистрации содержит низкоэнергетичный канал, порог срабатывания которого 0.5 МэВ (для внутренних, защищенных от радиоактивности породы счетчиков). Данные, используемые для исследования фона низкоэнергетичных импульсов, формируются следующим образом: каждые 10 мин все сцинтилляционные счётчики башни запускаются импульсом от генератора на регистрацию низкоэнергетичных импульсов в течение 10 с. Ввиду невысоких энергий гамма-кванты проникают в счётчик главным образом через верхнюю грань счётчика, толщина металла которой 4 мм. Боковые и нижняя грани счётчика экранированы дополнительными 20 мм металла. Так как порог регистрации энергодельностей во внутренних счетчиках — 0.5 МэВ, установка способна фиксировать практически все из «распадных радоновых» гамма-квантов, падающих на счётчик сверху.

При обработке данных из них отбираются наиболее стабильно работающие в течение длительного времени. Суммарный темп счета нормируется на один счетчик в герцах (Hz). Темп счёта измеряется автоматически. Количество отсчётов, обусловленных радоном, для 70 внутренних счётчиков одной башни составляет порядка 3×10^5 за 10 с. Это задаёт чувствительность метода 5% на уровне 3σ , т. е. за 10-секундный интервал измерений установка зафиксирует 5%-е отклонение концентрации с достоверностью $\sim 99.7\%$. Данные суммируются в бине за 1 час. Общее число отсчетов в одном бине около 184000 (~ 420 отсчетов за 10 с $\times 73$ счетчика $\times 6$ запусков в час), что дает относительную ошибку измерений $\sim 0.2\%$.

Используя методику, описанную выше, мы получаем временные ряды измерения количества фоновых импульсов детектора. Пример временного ряда за апрель и май 2022 г. показан на рис. 1. Можно заметить, что полный фоновый темп счёта установки LVD разделяется на две составляющие: переменную, «радоновую», и постоянную, связанную с соб-

ственной радиоактивностью материалов установки и окружающей среды. Радоновые пики образуются за счёт диффузии радона из слоя породы небольшой толщины и выхода из грунтовых вод; в последнем случае толщина радонопоставляющего слоя значительно увеличивается [?].

2. СРАВНЕНИЕ ДАННЫХ LVD С ПОКАЗАНИЕМ РАДОНОМЕТРА

Подтверждением того, что «радоновые» пики фоновых импульсов LVD связаны с инъекцией радона в атмосферу зала, является явная корреляция временных рядов данных LVD и радонметра, помещенного внутри (между башнями) детектора (рис. 2). Радонметр измеряет альфа-частицы ионизационной камерой с потоком воздуха 1.0 л/мин.

Наблюдается задержка между данными LVD и данными радонметра. Максимум корреляции получается при задержке данных радонметра примерно на два часа относительно данных LVD [?]. По данным радонметра мы можем откалибровать данные LVD с точки зрения активности радона. Изменение около 7 Бк/м^3 вызывает в среднем изменение на 1 Гц в низкоэнергетических данных LVD.

3. ВАРИАЦИИ ФОНОВЫХ ИМПУЛЬСОВ LVD

Используя метод наложения эпох (эпоха составляет одну неделю), мы обнаружили, что открытие и закрытие ворот в зал, где находится установка влияет на скорость счета фоновых импульсов. Приточная вентиляция создает избыточное давление, при открывании/закрывании ворот давление скачет и радон начинает выходить из стен. Также проезд автомобилей по транспортному тоннелю вызывает вибрацию грунта, в результате чего увеличивается выброс радона в атмосферу зала.

Скорость счета увеличивается (на $\sim 5\%$) начиная с утра и до обеда, затем наблюдается обеденный провал, опять нарастание и потом плавный спад после 18 часов (видно двухгорбую форму пика). Более того, время пика смещается при переводе часов на летнее время (время записи событий в LVD — фиксированное в UTC). Данная картина наблюдается только в рабочие дни. В выходные и праздничные нет никакого увеличения в скорости счета фоновых импульсов LVD [?].

Определению характеристик аномальных возрастаний скорости счёта фоновых импульсов (радоновых пиков) установки было посвящено несколько измерений, которые дали возможность однозначно ассоциировать пики именно с инъекцией радона. Через открытые ворота общей площадью 50 м^2 в экспериментальный зал впускался воздух из соседних неветилируемых помещений с повышенной концентрацией радона. Ворота открывались на фиксированное время: 1 — 0.5 ч, 2 — 3 ч и 3 — 6 ч.

Время нарастания величины CR при этом составило: 3 ч — в первых двух случаях и 6 ч — в последнем (рис. 3). Отсюда можно заключить, что время перемешивания воздуха в зале около 3 ч. Это означает, что если нарастание пика превышает 3 часа, то длительность фронта пика соответствует времени инъекции радона в атмосферу зала.

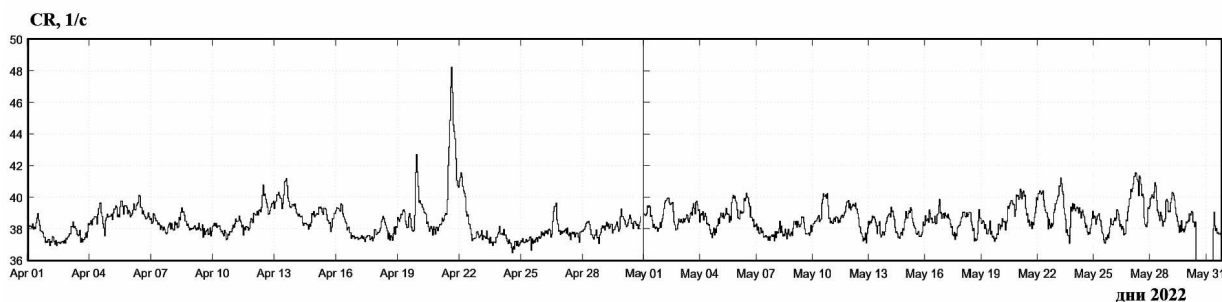


Рис. 1. Пример временного ряда скорости счета фоновых событий LVD за апрель и май 2022 г.

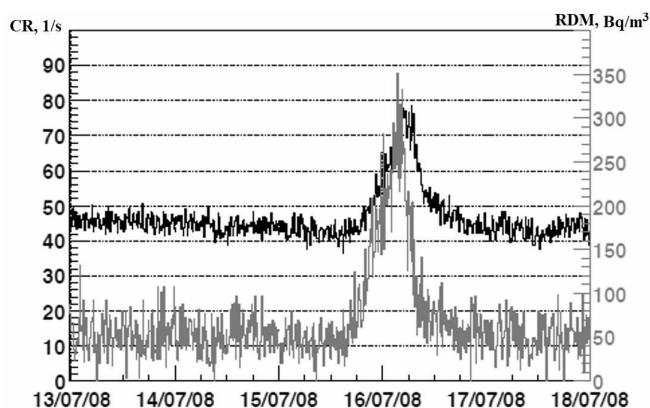


Рис. 2. Скорость счета фоновых импульсов LVD (черная гистограмма) и данные радонметра (серая гистограмма)

Рост концентрации радона при открытых воротах одновременно регистрировался радонметром, помещенным в структуру установки LVD.

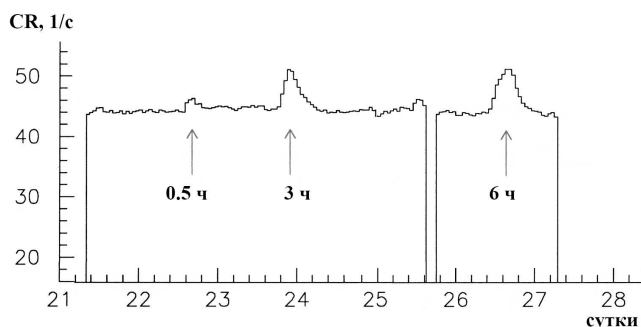


Рис. 3. Радоновые пики при открытых воротах

Исследуя достаточно большие пики, мы нашли, что длительность экспоненциального спада составляет до ~ 14 часов, а показатель экспоненты $\tau \sim 3$ часа.

Полученные величины гораздо меньше времени жизни радона ($\tau_{Rn} = 5.5$ суток), следовательно, форма пика обусловлена инъекцией радона в атмосферу зала и его выдувом вентиляцией. Действительно, спад концентрации радона в зале неплохо согласуется с расчётным законом $C_{Rn}(t) = C_0 \exp(-t/\tau_{vent})$, где $\tau_{vent} = V_{hall}/F = 2.75$ часа, $V_{hall} = 22000 \text{ м}^3$, $F = 8000 \text{ м}^3\text{час}^{-1}$ — мощность приточной вентиляции.

Некоторые аномальные пики в данных LVD мы ассоциируем с выбросом радона, связанным с мощ-

ными землетрясениями. Впервые на возможности установки для изучения вариаций концентрации радона под землей было обращено внимание в дни наиболее сильных сейсмических толчков в Италии (сентябрь 1997 и 1999 гг.). Также сильно поднялся общий уровень фона перед разрушительным землетрясением в апреле 2009 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании приведенных измерений можно сделать следующие заключения:

1. В подавляющем большинстве радоновые (небольшие) пики являются техногенными, т.е. обязаны своим происхождением человеческой деятельности.
2. Наиболее вероятно, что довольно быстрые, с геофизической точки зрения, инъекции радона в атмосферу зала (среднее время нарастания пиков до максимума около 8 часов) вызываются вибрацией грунта от автомобильного движения по двум транспортным туннелям, интенсивность которого зависит от рабочего времени.
3. Радоновые пики образуются за счёт диффузии радона из слоя породы небольшой толщины и выхода из грунтовых вод.
4. Деформация земной коры и микротолчки способствуют насыщению подпочвенного слоя радона, постоянно образующимся в грунте, что дает надежду на применение наших исследований в области предсказаний сейсмических событий.

Авторы хотели бы упомянуть всех членов коллаборации LVD, которые внесли вклад разработку и строительство детектора LVD, обработку и анализ данных.

N. Yu. Agafonova¹, M. Aglietta^{2,4}, P. Antonioli⁵, V. V. Ashikhmin¹, G. Bari⁵, G. Bruno^{6,7}, E. A. Dobrynina¹, R. I. Enikeev¹, W. Fulgione^{6,4}, P. Galeotti^{2,4}, M. Garbini^{5,8}, P. L. Ghia⁹, P. Giusti⁵, E. Kemp¹⁰, V. Korchagin¹, P. Korchagin¹, V. Kuznetsov¹, A. S. Malgin¹, A. Molinaro^{6,11}, V. G. Rjasny¹, R. Persiani⁵, I. A. Pless¹², O. G. Ryazhskaya¹, G. Sartorelli⁵, I. R. Shakiryanova¹, M. Selvi⁵, V. Talochkin¹, G. C. Trincherо^{2,4}, C. F. Vigorito², V. F. Yakushev¹, and G. T. Zatsepin¹, A. Zichichi^{5,8}

¹ Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences 117312, Moscow, Russia,

- ² Department of Physic, University of Turin and INFN-Turin, Italy,
⁴ INAF, Osservatorio Astrofisico di Torino, Turin, Italy,
⁵ University of Bologna and INFN-Bologna, Italy,
⁶ INFN, Laboratori Nazionali del Gran Sasso, Assergi, L'Aquila, Italy,
⁷ New York University Abu Dhabi, NYUAD, United Arab Emirates,
⁸ Centro Enrico Fermi, 00184 Roma, Italy,
⁹ Institut de Physique Nucleaire, CNRS, 91406 Orsay, France,
¹⁰ University of Campinas, Campinas, Brazil,
¹¹ Gran Sasso Science Institute, L'Aquila, Italy,
¹² Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Aglietta M., Alpat B., Alyea E.D. et al.* // Il Nuovo Cimento. 1992. **105A**. N12. P. 1793.
2. *Haffke M., Baudis L., Bruch T., Ferella A.D. et al.* // Nucl. Instrum. Meth. A. 2011. **643**. P. 36.
3. *Arpessella C.* // Nucl. Phys. B. (Proc. Suppl.) 2002. **28** P. 420.
4. *Bucci C., Capelli S., Carrettoni M. et al.* // Eur. Phys. J. A. 2009. **41**. P. 155.
5. *Bellini F., Bucci C., Capelli S. et al.* // Astropart. Phys. 2010 **33** P. 169.
6. *Agafonova N.Yu., Aglietta M., Antonioli P. et al.* (LVD Collaboration) // Astrophys. J. 2015. **802**. P. 47.
7. *Агафонова Н.Ю., Алексеев В.А., Добрынина Е.А. и др.* // Препринт N1071/2001 ИЯИ РАН. 2001.
8. *Bruno G., Menghetti H.* (LVD Collaboration) // Journal of Physics: Conference Series. 2006. **39**. P. 278.
9. *Агафонова Н.Ю., Ашихмин В.В., Добрынина Е.А. и др.* // Изв. РАН Сер. Физ. 2019. **83**. №5. С. 673.

Measurement of radon decays with the LVD-setup for neutrino searching

N. Yu. Agafonova^{1,a}, E. A. Dobrynina¹, N. A. Filimonova^{1,2}

¹*Institute for Nuclear Research of RAS, Moscow 117312, Russia*

²*Faculty of Physics and Power Engineering, Department of Fundamental Interactions and Cosmology, Moscow Institute of Physics and Technology Moscow Region, Dolgoprudny, 141701, Russia*
 E-mail: ^aagafonova@inr.ru

The LVD (Large Volume Detector), located at the Low Background Laboratory, Gran Sasso, Italy, is built to detect neutrinos from stellar core collapses in our Galaxy. The peculiarity of the search for rare events requires close attention to the background of the experiment, such as the natural radioactivity of the rock and detector materials and the interaction of cosmic ray muons underground. The LVD is capable of detecting gamma quanta from the decay of radon daughter nuclei. We convincingly show the connection between the change in the background counting rate from gammas in the detector and the change in the concentration of radon nuclei in the experimental hall. We also point out the existence of another source of radon change, this is seismic activity.

Keywords: radioactive decays, radon, scintillation methods.

PACS: 23.40.-S, 29.40.Mc, 91.30.-f.

Received 28 September 2022.

English version: *Moscow University Physics Bulletin. 2022. 78, No. 1. Pp. .*

Сведения об авторах

1. Агафонова Наталья Юрьевна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 850-42-16, e-mail: agafonova@inr.ru.
2. Добрынина Екатерина Анатольевна — науч. сотрудник; тел.: (495) 850-42-16, e-mail: dobrynina@inr.ru.
3. Филимонова Наталья Александровна — лаборант; тел.: (495) 850-42-16, e-mail: filimonova@inr.ru.