

ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ВАРИАЦИИ КОНЦЕНТРАЦИИ РАДОНА В ПОДЗЕМНОЙ ЛАБОРАТОРИИ ГРАН САССО, ИЗМЕРЕННЫЕ С ПОМОЩЬЮ LVD

Н. Ю. Агафонова^{a}, Е. А. Добрынина^{a**}, Н. А. Филимонова^{a,b***}, И. Р. Шакирьянова^a,
от имени Коллаборации LVD*

^a *Институт ядерных исследований Российской академии наук
117312, Москва, Россия*

^b *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
141701, Долгопрудный, Московская обл., Россия*

Поступила в редакцию 4 марта 2023 г.,
после переработки 17 марта 2023 г.
Принята к публикации 17 марта 2023 г.

Представлен анализ временных рядов гамма-квантов от естественной радиоактивности в подземной лаборатории LNGS (Италия), измеренных с помощью детектора большого объема (LVD). Установка предназначена для регистрации нейтрино от гравитационных коллапсов звездных ядер в Галактике. Фоном эксперимента являются нейтроны и гамма-кванты от распада дочерних ядер урана и тория. Анализ периодических изменений числа гамма-квантов, обусловленных содержанием радона в подземной лаборатории, показал наличие суточной, недельной, лунно-месячной и годовой модуляций. В работе приводятся данные с 2004 по 2021 гг., включая период пандемии — время низкой активности работ в зале LNGS.

DOI: 10.31857/S0044451023090079
EDN: KCOFRK

1. ВВЕДЕНИЕ

Учет фона в экспериментах, проводимых в подземных лабораториях, представляет собой сложную задачу. Источники фона под землей можно разделить на следующие четыре составляющие:

а) радиоактивность окружающих горных пород, включая нейтроны от естественного деления и (α, n) -реакции;

б) присутствие радиоактивных примесей в материале детекторов и их защиты;

в) содержащийся в воздухе и воде газ радон ^{222}Rn и продукты его распада;

г) мюоны космических лучей и их вторичные частицы.

Постоянные составляющие а) и б) можно оценить и определить на этапе создания экспериментов. Содержание радиоактивных элементов (рядов урана, тория и радиоактивного изотопа калия) оценены для разных пород грунта и могут быть измерены различными методами [1, 2].

Составляющая г) известна с достаточно большой точностью [3]. Недавно получены вариации мюонов за 24 года наблюдений и измерен поток мюонов с высокой точностью на глубине 3600 м в.э. [4]. Но несмотря на известный поток мюонов под землей, вторичные частицы, а именно нейтроны, генерированные мюонами, еще не до конца изучены. Измерения сезонных вариаций нейтронов от мюонов под землей получены только в работе [5]. Численного моделирования не проводилось, оценки потока нейтронов от мюонов как фона под землей были сделаны в [6]. Вето-защита, которую обычно используют от мюонов, срабатывает только при попадании мюонов в детектор, а нейтроны, генерированные мюонами, прошедшими в грунте рядом с детектором, могут свободно проникать в детектор. Однако же энер-

* E-mail: agafonova@inr.ru

** E-mail: dobrynina02@mail.ru

*** E-mail: filimonova.na@phystech.edu

гетические спектры нейтронов, генерированные мюонами, полученные в экспериментах KARMEN [7], LVD [8] и в подземной лаборатории Soudan [9], имеют пределы до 80 МэВ, 500 МэВ и 70 МэВ соответственно. Способность нейтронов уходить от мюонного трека — поперечное распределение — была измерена в экспериментах LVD [10–12], KamLand [13], Bogexino [14], Daya Bay [15]. Максимальное расстояние, которое нейтроны могут пройти, получено в LVD (мишень C_nH_{2n} и Fe) и составило приблизительно 14 м [12].

Фон от радона в атмосфере помещений (составляющая в) тяжело измерить, так как подвижность и хорошая растворимость в воде этого газа мешает проводить точные измерения. Также известно о существовании в земной коре радон-нейтронных приливных вариаций, связанных с лунными периодами и имеющих гравитационное происхождение [16, 17]. В работе [17] получены суточные и месячные приливные вариации концентрации радона в земной коре. На концентрацию радона влияют многие факторы: изменение температуры, влажности, давления, вибрация грунта. В работе [18] были обнаружены спорадические увеличения потока тепловых нейтронов, которые объясняются адвекцией грунтовых газов (эффект барометрической откачки радона).

В Лаборатории Гран Сассо (LNGS, Италия) на средней глубине 3600 м в. э. проводятся подземные низкофоновые эксперименты, температура и влажность в залах изменяются мало. Низкое содержание урана и тория в горных породах [19] создает условия для изучения редких событий, предсказываемых теорией в физике частиц и астрофизике. Работа приточной вентиляции и близость загруженного транспортного туннеля вызывают колебания концентрации радона в течении суток. В зале А лаборатории LNGS находится детектор LVD [20], способный не только выполнять свою основную задачу — регистрацию нейтрино, но и контролировать уровень фона и исследовать его вариации. Цель данной работы — показать возможности детектора LVD для изучения вариаций концентрации радона в подземном помещении. За время работы установки набран большой объем данных и можно выделить суточные, недельные и годовые вариации радона.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА LVD В LNGS И МЕТОДИКИ РЕГИСТРАЦИИ

Детектор большого объема LVD — эксперимент для поиска нейтринного излучения от вспышек

сверхновых в нашей Галактике. Основной реакцией взаимодействия нейтрино является обратный бета-распад:

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n, \quad n + p \rightarrow d + \gamma.$$

В режиме непрерывного поиска нейтрино детектор работает с 1992 г., с 2004 г. входит в систему раннего предупреждения о вспышках сверхновых — SNEWS [21]. В силу своих конструктивных особенностей детектор также располагает широкими возможностями для изучения мюонов космических лучей и продуктов их взаимодействия под землей. Методика регистрации нейтринного сигнала и мюонов, а также последние результаты эксперимента опубликованы в [22, 23].

Установка LVD содержит около 1000 т жидкостного сцинтиллятора (C_nH_{2n} , $\bar{n} = 9.6$) и около 1000 т железа [20]. Сцинтиллятор залит в 840 счетчиков. Счетчики имеют форму параллелепипеда ($100 \times 100 \times 150$ см³) и сделаны из нержавеющей стали толщиной 4 мм. На верхней грани каждого счетчика установлены три фотоумножителя (ФЭУ-49Б), включенные на совпадение. Счетчики помещены по 8 штук в металлические модули-контейнеры (толщина стенок 20 мм), из которых набираются вертикальные колонны. Пять колонн объединены в башню. Установка состоит из трех башен, в каждой по 280 счетчиков. Геометрически мы разделяем счетчики на внешние и внутренние.

Установка имеет два порога регистрации: верхний (HET) для позитрона от реакции обратного бета-распада, $E_{HET} > 5$ МэВ, и нижний (LET) для гамма-квантов от захвата нейтрона, $E_{LET} > 0.5$ МэВ.

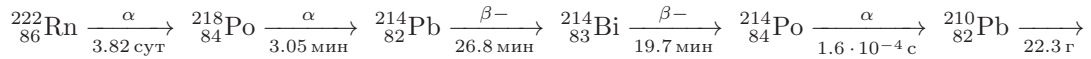
Основными источниками фона по низкому порогу на установке LVD являются естественная радиоактивность грунта и радон, который образуется в грунте в результате деления и распадов элементов уранового и ториевого рядов. Радон выходит в атмосферу подземного помещения через множественные микротрещины в породе, хорошо растворяется в воде и переносится подземными водами.

Таким образом, фоновый темп счета LVD можно разделить на две составляющие: постоянную, связанную с радиоактивностью материалов установки и окружающей среды (в основном скальной породы), и переменную, связанную с изменением концентрации радона в подземных помещениях. С помощью дополнительных измерений, проведенных альфа-частичным радиометром радона (радонометром), было найдено, что количество отсчетов установки, обусловленных радоном, составляет $\sim 10\%$

от полного темпа счета по нижнему порогу, что соответствует концентрации радона ~ 25 Бк/м³.

Гамма-кванты, регистрируемые LVD, это гамма-кванты от захватов нейтронов протонами сцинтиллятора и ядрами железа и гам-

ма-кванты от распадов дочерних ядер радона, период полураспада которого 3.8 сут. Наиболее вероятная цепочка радиоактивных распадов:



Гамма-излучение создается в основном ядрами висмута ${}^{214}\text{Bi}$, за счет β -распада превращающимися в полоний с характерным временем 19.7 мин. Энергетический спектр гамма-излучения охватывает диапазон от 0.6 до 2.5 МэВ. Поскольку порог регистрации энерговыделений во внутренних счетчиках 0.5 МэВ, установка способна регистрировать весь диапазон [24].

Ввиду невысоких энергий гамма-кванты проникают в счетчик главным образом через верхнюю грань счетчика, толщина металла которой 4 мм. Боковые и нижняя грани счетчика экранированы дополнительными 20 мм металла.

При обработке данных отбираются наиболее стабильно работающие внутренние счетчики в течение длительного времени. Число включаемых в обработку счетчиков варьируется от 60 до 76 из 80 внутренних счетчиков одной башни. Суммарный темп счета нормируется на один счетчик в герцах. Количество отсчетов, обусловленных радоном, для 70 счетчиков составляет около 3150 за 10 с. Это задает чувствительность метода 5% на уровне 3σ , т. е. за 10-секундный интервал измерений установка фиксирует 5-процентное отклонение концентрации с достоверностью $\sim 99.7\%$.

Для исследования фона низкоэнергетичных импульсов $E_{\text{NET}} > 0.5$ МэВ данные формируются следующим образом: каждые 10 мин все сцинтилляционные счетчики башни запускаются импульсом от генератора на регистрацию в течение 10 с. Таким образом формируются временные ряды событий $C_{\text{Rn}}(t)$, которые группируются в часовые данные, приведенные на секунду и нормированные на 1 счетчик.

Особенность метода регистрации позволяет выделить временные характеристики аномальных вариаций величины C_{Rn} : время возрастания (фронт) от 3 до 10 ч и экспоненциальное уменьшение длительностью до ~ 14 ч с показателем экспоненты $\tau \sim 3$ ч. Вариации такого вида мы называем «радоновыми пиками». Как видим, полученные величины гораздо меньше времени жизни радона

($\tau_{\text{Rn}} = 5.5$ сут), следовательно, форма пика обусловлена инъекцией радона в атмосферу зала и его выдувом вентиляцией. Можно показать, что убывание концентрации радона в зале неплохо согласуется с расчетным законом: $C_{\text{Rn}}(t) = C_0 \exp(-t/\tau_{\text{ven}})$, где $\tau_{\text{ven}} = V/F = 2.75$ ч, $V = 22000$ м³ — объем зала А без оборудования, $F = 8000$ м³ · ч⁻¹ — мощность вентиляции [25].

По окончании пика величина C_{Rn} принимает постоянное, равновесное (между эманацией из грунта и воды, с одной стороны, и вентиляцией — с другой) значение.

Радоновые пики бывают разной высоты и длительности. Наша задача — попытаться разделить пики на «техногенные», обусловленные деятельностью человека и техники под землей, и «аномальные», связанные с сейсмической активностью; а также выделить плавные изменения концентрации радона, возникающие из-за гравитационно-приливных и сезонных эффектов.

Идентификации аномальных возрастных темпа счета установки как «радоновых пиков» было посвящено несколько измерений, которые дали возможность однозначно ассоциировать пики именно с инъекцией радона [24, 26, 27].

3. ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ВАРИАЦИИ

В анализе периодических вариаций величины $C_{\text{Rn}}(t)$ мы использовали данные за 18 лет работы детектора с 01.01.2004 по 31.12.2021. Временной ряд $C_{\text{Rn}}(t)$ первой башни LVD представлен на рис. 1.

С 2004 до 2008 гг. (период I) [28] в лаборатории работала система вентиляции, отличная от «обычной» 1992–2003 гг. и 2009–2021 гг. (период II). В период I велось активное строительство детектора Gerda, который находится рядом с LVD (в 10 м). В подтверждение действия вентиляции мы исследовали поведение суточных и недельных данных $C_{\text{Rn}}(t)$, в которых видно разную форму пиков во

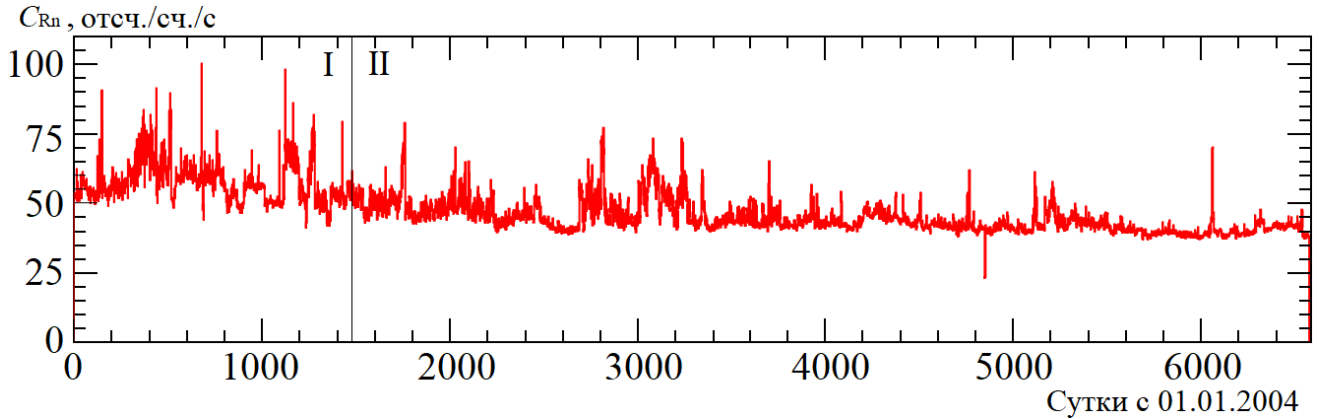


Рис. 1. Временной ряд суточных данных LVD башни Т1 с 2004 по 2022 гг. Цифрами I и II показаны разные периоды работы вентиляции

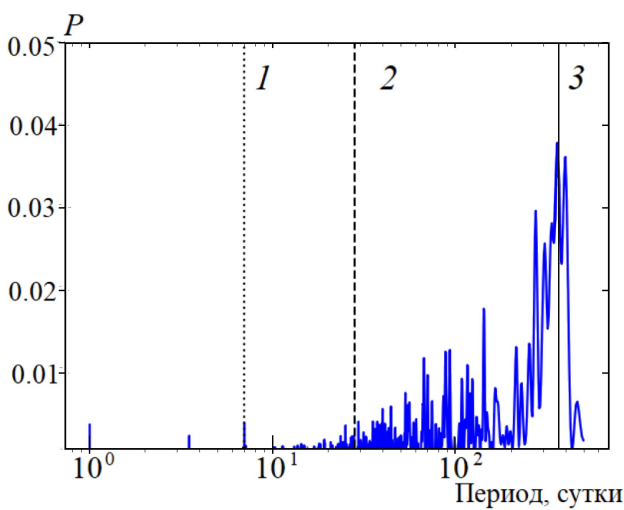


Рис. 2. Периодограмма анализа Ломба–Скаргла часовых данных с 2008 по 2022 гг. Цифрами около линий показаны периоды 1 — неделя, 2 — месяц, 3 — год

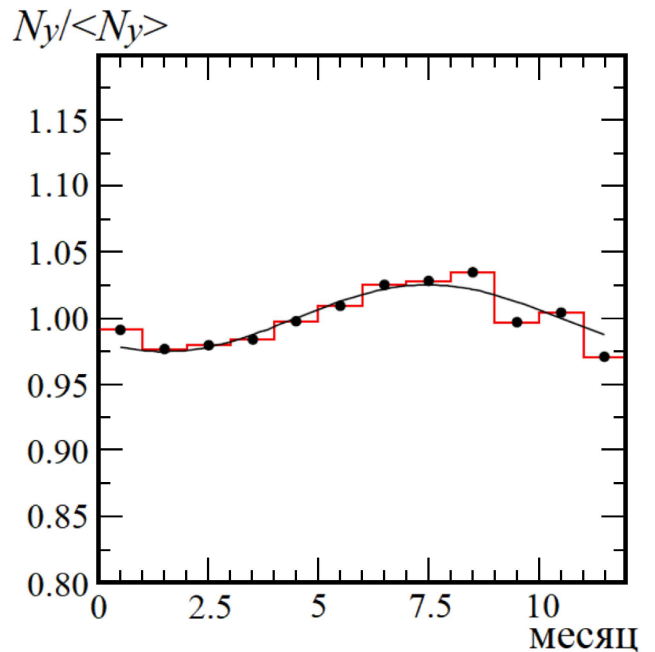


Рис. 3. Годовые вариации темпа счета C_{Rn} в относительных величинах $N_y/\langle N_y \rangle$, полученные методом наложения эпох. Кривая — аппроксимация гармонической функцией (см. пояснение в тексте)

временных рядах (см. разд. 3.3), вызванную изменением режима вентиляции.

Для поиска периодических сигналов в скорости счета мы применили анализ Ломба–Скаргла к временным рядам $C_{Rn}(t)$ (рис. 2). Этот метод во многом аналогичен более знакомой спектральной плотности мощности Фурье, но применяется для поиска периодичности в данных с нерегулярной выборкой. Анализ Ломба–Скаргла не показал значимых периодов (кроме годового). Мы предполагаем, что это связано с природой исследуемых явлений, на которые влияют погодные, сейсмические условия и т. д., различающиеся год от года.

Чтобы детально исследовать характеристики вариаций, мы применили метод наложения эпох. Этот метод заключается в наложении (суммировании) друг на друга данных, разбитых на равные бины

временного ряда, при фиксированном периоде (эпохе). Здесь и далее мы будем использовать данные первой башни (Т1) LVD, так как она работала наиболее стабильно, отличие скоростей счета только в коэффициенте 1.06 и 1.49 для второй (Т2) и третьей (Т3) башни соответственно. Скорость счета гамма-квантов Т3 больше, чем у других башен из-за геометрического расположения в зале: Т3 «открыта» с одной стороны; остальные башни окружены скальными породами и бетоном (Т1 — с трех сторон, Т2 — с двух сторон, Т2 находится между Т1 и Т3).

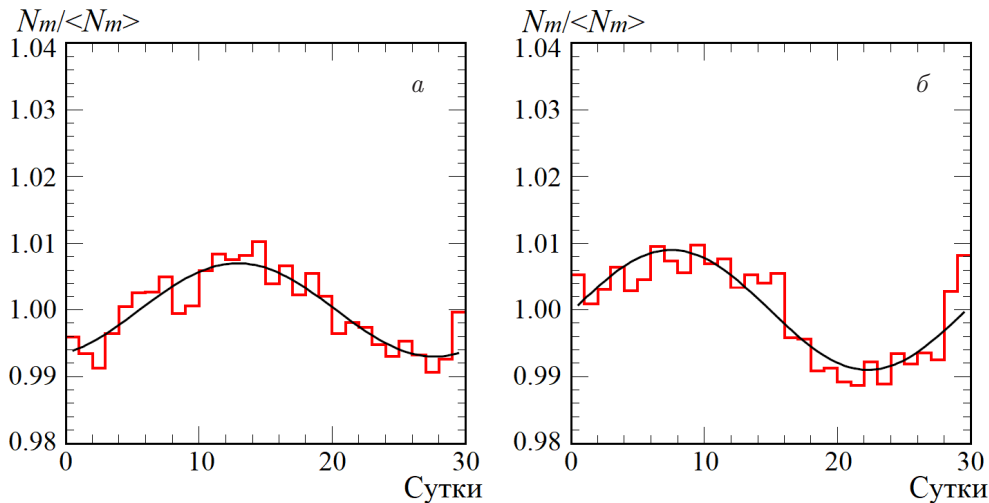


Рис. 4. Лунно-месячные вариации C_{Rn} . а — за весь период 2004–2021 гг. (полнолуние приходится на 7 сутки); б — период II с 2009 по 2019 гг. (полнолуние приходится на 11 сутки). Кривая — аппроксимация гармонической функцией (см. пояснение в тексте)

3.1. Годовые вариации концентрации радона

С целью выделения долговременной составляющей вариаций концентрации радона был проведен анализ данных с 2009 по 2021 гг. (период II). Использовались нормированные на среднее в год данные $C_{Rn}(t)$, чтобы привести к единице.

Амплитуда модуляции колебаний темпа счета $\delta N_y / \langle N_y \rangle$ и фаза ϕ_y с достаточной точностью были установлены методом наложения эпох за 13 лет наблюдений с периодом 1 год (рис. 3). Эти результаты хорошо обеспечены статистически: измерения проводятся каждые 10 мин, а затем усредняются по большому объему данных. Каждый бин гистограммы рис. 3 содержит порядка $3 \cdot 10^7$ отсчетов, что дает ошибку измерений порядка 0.002%.

С помощью аппроксимации временного распределения законом

$$N_y(t) = 1 + \delta N_y / \langle N_y \rangle \cos(2\pi(t - \phi_y) / T)$$

с бином 1 мес. при $T = 12$ мес. были получены значения величин модуляции

$$\delta N_y / \langle N_y \rangle = (3.0 \pm 1.1)\%$$

и фаза

$$\phi_y = (7.5 \pm 0.5) \text{ мес.}$$

Ошибка определения величины $\delta N_y / \langle N_y \rangle$ связана с колебанием физических условий год от года, количеством осадков, атмосферными и сейсмическими явлениями в регионе.

Максимум вариаций находится в августе. Радон переносится подземными водами, и его максимальная концентрация достигается во время максимального насыщения скалы водой.

3.2. Лунно-месячные вариации концентрации радона

Синодический лунно-месячный период (промежуток между одинаковыми фазами луны) составляет 29.53 земных суток. Другие лунные периоды (аномалистический, сидерический, драконический), имеющие длительность 27.21–27.55 сут вносят искажения в поиск вариаций, связанных с максимальными приливными эффектами. Поэтому метод наложения эпох будет давать приблизительный результат. Мы приняли эпоху равную 708 ч, или $708/24 = 29.5$ сут. Таким образом, за 13 лет у нас будет около 160 периодов.

Результат метода наложения лунно-месячных эпох показан на рис. 4. В каждом бине усреднены данные за 5260 ч. С помощью аппроксимации временного распределения законом

$$N_m(t) = 1 + \delta N_m / \langle N_m \rangle \cos(2\pi(t - \phi_m) / T)$$

с бином 1 сут при $T = 29.5$ сут были получены значения величин модуляции $\delta N_m / \langle N_m \rangle = (0.8 \pm 0.15)\%$ и фаза ϕ_m (максимум кривой), которая соответствует дню полнолуний. Фаза лунно-месячных вариаций — полнолуние — получается одинаковой для любого периода наблюдений: 2004–2008 гг. (полнолуние приходится на 7 сутки) рис. 4а, 2009–2019 гг. (полнолуние приходится на 11 сутки) рис. 4б.

3.3. Недельные вариации концентрации радона

На рис. 5 приведены вариации $C_{Rn}(t)$ в течение одной недели (с понедельника по воскресенье). Гра-

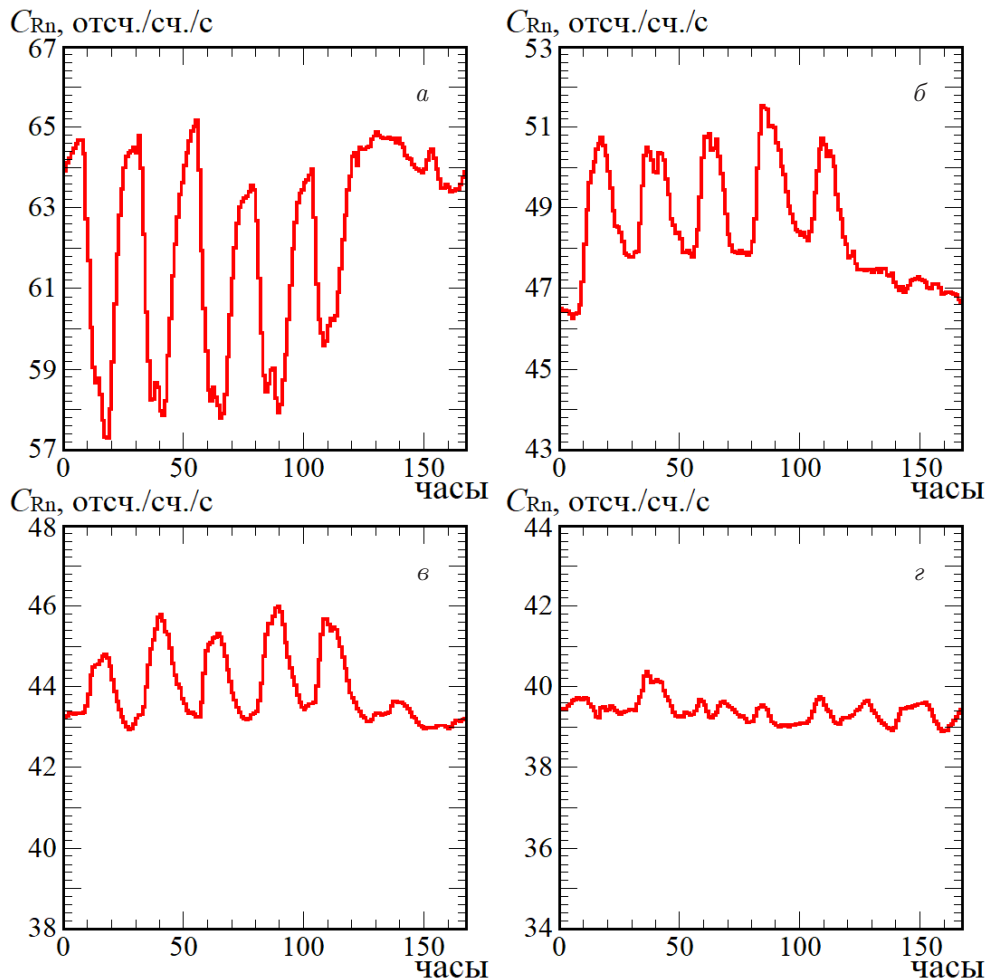


Рис. 5. Недельные вариации C_{Rn} за 2005 (а), 2009 (б), 2013 (в) и 2020 (г) гг., полученные методом наложения эпох (эпоха — 1 неделя = 168 ч)

фики получены методом наложения эпох: просуммированы соответствующие день недели и час в течение года и усреднены. На рисунке приведены характерные примеры за 2005, 2009, 2013 и 2020 гг.

На рис. 5а показан режим работы вентиляции в период I. Можно заметить, что в ночные часы концентрация радона растет, в течении рабочего дня уменьшается, вечером опять начинает расти; в выходные дни концентрация остается на высоком «ночном» уровне.

Режим работы вентиляции периода II показан на рис. 5б, в. На гистограммах видны дневные увеличения концентрации и уменьшение к ночи; в выходные дни низкая концентрация на уровне «ночных» значений.

На рис. 5г представлен 2020 г. — год пандемии. Из-за ограничений, связанных с Ковидом-19, были запрещены работы на экспериментах в подземной лаборатории, кроме обязательных мероприятий. Отличие средних значений темпов счета в

дневные и ночные часы в 2020 г. меньше обычной: $\delta N_{week}(2020) \cong 2\%$, в то время как в 2009 и 2013 гг. — около 7% и 5% соответственно.

На изменение концентрации $C_{Rn}(t)$, кроме работы приточной вентиляции, также влияют следующие факторы:

- 1) открывание и закрывание дверей на длительное время $\sim 1-3$ ч, для работы техники (подвоз оборудования и материалов);
- 2) движение транспорта в туннеле рядом с лабораторией, так как в выходные дни почти нет движения большегрузных машин. Подобные эффекты в туннелях и подземных залах были описаны в работах [29] и [30, 31].

3.4. Суточные вариации концентрации радона

Суточные вариации $C_{Rn}(t)$ за 24 ч получены методом наложения эпох для рабочих дней с понедельника на пятницу и для выходных дней (суббота,

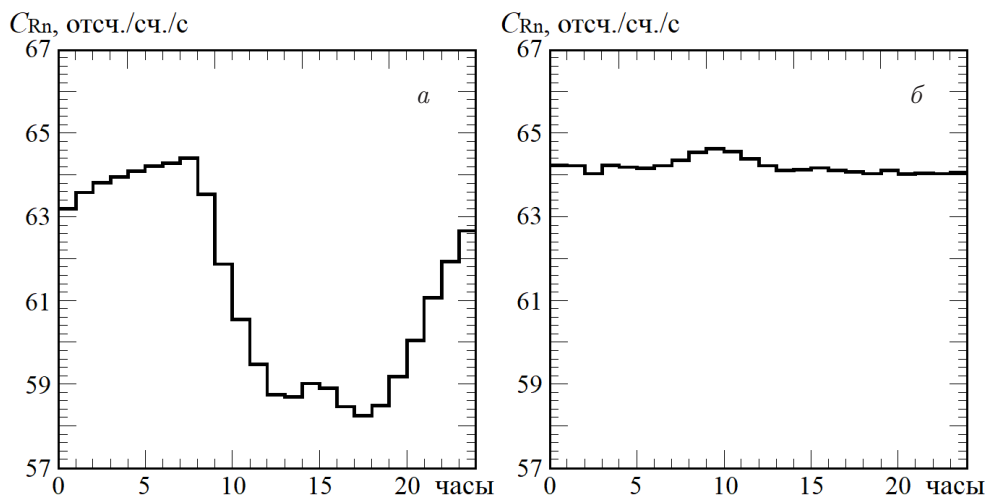


Рис. 6. Суточные вариации $C_{Rn}(t)$ 2005 г., полученные методом наложения эпох, где эпоха 24 ч, (*a* — для рабочих дней, *б* — для выходных)

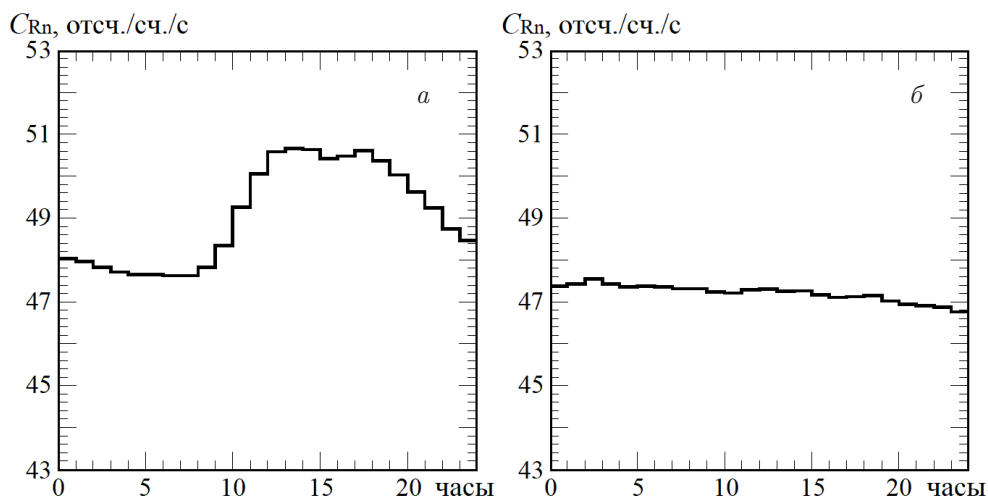


Рис. 7. Суточные вариации $C_{Rn}(t)$ 2009 г., полученные методом наложения эпох, где эпоха 24 ч, (*a* — для рабочих дней, *б* — для выходных)

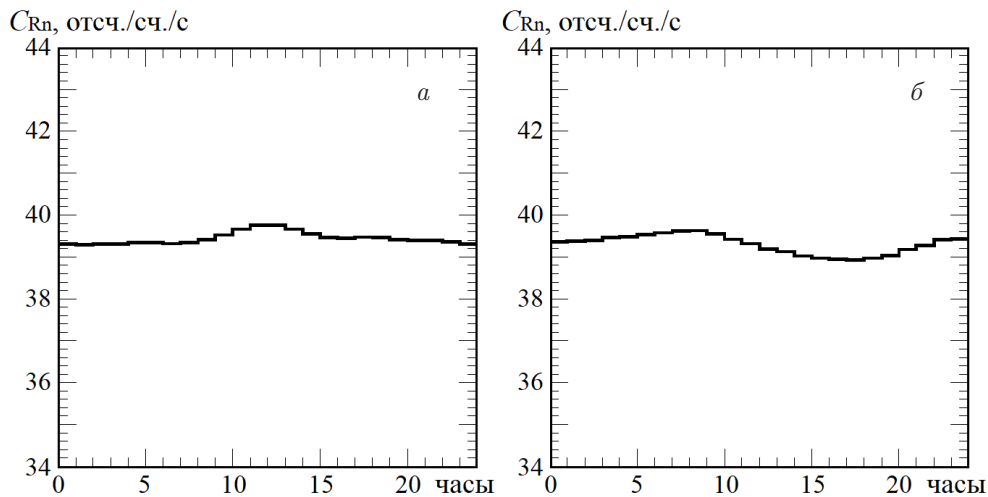


Рис. 8. Суточные вариации $C_{Rn}(t)$ 2020 г., полученные методом наложения эпох, где эпоха 24 ч, (*a* — для рабочих дней, *б* — для выходных)

воскресенье). На рис. 6–8 показаны примеры для 2005 г. (относится к периоду I), 2009 г. (период II) и 2020 г. (период пандемии) соответственно.

Временной ход темпа счета в 2005 г. в рабочие дни имеет два минимума, которые расположены на временной шкале около 12 и 16 ч. В районе 14 ч наблюдается повышение темпа счета (рис. 6а).

Временной ход темпа счета в 2009 г. в рабочие дни имеет два максимума, которые расположены на временной шкале около 12 и 16 ч. В районе 14 ч наблюдается снижение темпа счета (рис. 7а). Максимум вариации составляет 6.7%.

В выходные дни (суббота и воскресенье) для всех годов темп счета фоновых событий имеет другой вид: отсутствуют выраженные максимумы и не наблюдается увеличения темпа счета в рабочее время (рис. 6б, 7б).

Заметим, что в пандемийные годы, 2020 и 2021 гг. (рис. 8 — пример 2020 г.), суточного хода вариаций $C_{Rn}(t)$ почти нет ($< 1\%$).

Поведение суточного хода (период II) объясняется корреляциями с человеческой деятельностью в рабочее время: открыванием и закрыванием ворот в зал эксперимента. Благодаря хорошей изоляции помещения и действию приточной вентиляции, при закрытых воротах концентрация радона в зале достаточно низкая и составляет ~ 25 Бк/м³. В прилегающих коридорах она больше в несколько раз. Ночью приточная вентиляция при закрытых воротах создает избыток давления, который уменьшает выход радона из скалы. Днем в рабочее время открываются ворота, что приводит к увеличению концентрации радона в зале LVD. Во-первых, начинает поступать воздух из соседних помещений с повышенной концентрацией радона, во-вторых, давление в зале уменьшается и радон выходит из скалы в атмосферу зала интенсивнее.

Впервые на этот эффект, наблюдаемый в данных LVD, было указано нами в работе [24]. В работе [32] в данных 2016 г. также был обнаружен часовой сдвиг между распределениями «летних» и «зимних» периодов данных, что объясняется часовой разницей «летнего» и «зимнего» рабочего времени (часы установки всегда показывают «зимнее» время).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение вариаций радиоактивного фона под землей имеет важное значение для низкофоновых лабораторий. Помимо измерения постоянной составляющей фона, необходимо исследовать периодические и стохастические выбросы в среднем фоно-

вом уровне экспериментов. Нами исследован низкоэнергетический фон эксперимента LVD, связанный с распространением гамма-квантов от дочерних ядер радона в лаборатории LNGS.

Выбросы во временных рядах событий детектора связаны с инъекцией радона в атмосферу подземного помещения из микротрещин в грунте. На изменение концентрации радона в зале влияет техническая деятельность в лаборатории LNGS, интенсивное движение в автотранспортном туннеле, сейсмическая активность и приливные силы. Нами были обнаружены суточные, недельные, лунно-месячные и годовые вариации фона, связанные с изменением концентрации радона в подземном помещении. Недельные и суточные вариации обусловлены открыванием дверей в зал эксперимента для проведения технических работ, вследствие чего из соседних коридоров проникает воздух, более насыщенный радоном. Суточным вариациям также может способствовать микросейсмика, возникающая при движении грузового автотранспорта по туннелю. Техногенное происхождение этих вариаций хорошо демонстрируют представленные данные с установки LVD за 2020 г. (так как в период пандемии человеческая деятельность была минимальна). Впервые в данных LVD выявлены вариации, связанные с лунными циклами. Годовые вариации носят сезонный характер и связаны с изменением количества подземных вод, что влияет на распространение радона.

Изучая характер вариаций скорости счета фоновых импульсов по амплитуде и длительности, можно разделить составляющие фона и выделить различные эффекты, связанные с его изменением.

Целью дальнейших исследований является выявление характеристик вариаций концентрации радона под землей, коррелирующих с различными геофизическими и метеоэффектами.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 23-22-00048), <https://rscf.ru/project/23-22-00048/>.

LVD Collaboration: Authors and Affiliations

N. Yu. Agafonova¹, M. Aglietta^{2,3}, P. Antonioli⁴,
V. V. Ashikhmin¹, G. Bari⁴, G. Bruno^{5,6},
E. A. Dobrynina¹, R. I. Enikeev¹, W. Fulgione^{3,5},
P. Galeotti^{2,3}, M. Garbini^{4,7}, P. L. Ghia⁸, P. Giusti⁴,
E. Kemp⁹, A. S. Malgin¹, A. Molinaro^{5,10},
R. Persiani⁴, I. A. Pless¹¹, O. G. Ryazhskaya¹,
G. Sartorelli⁴, I. R. Shakiryanova¹, M. Selvi⁴,
G. C. Trincherо^{2,3}, C. F. Vigorito², V. F. Yakushev¹,
and A. Zichichi^{4,7}

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

² Department of Physics,
University of Turin and INFN
10125, Turin, Italy

³ INAF, Osservatorio Astrofisico di Torino
10025, Turin, Italy

⁴ University of Bologna and INFN
40127, Bologna, Italy

⁵ INFN, Laboratori Nazionali del Gran Sasso
67100, Assergi, L'Aquila, Italy

⁶ New York University Abu Dhabi, NYUAD
129188, Abu Dhabi, United Arab Emirates

⁷ Centro Enrico Fermi
00184, Roma, Italy

⁸ Laboratoire de Physique
des 2 Infinis Irène Joliot Curie, CNRS
91406, Orsay, France

⁹ University of Campinas
13083, Campinas, Brazil

¹⁰ Gran Sasso Science Institute
67100, L'Aquila, Italy

¹¹ Massachusetts Institute of Technology
02139, Cambridge, USA

В. Ф. Якушев (Коллаборация LVD), Н. М. Со-
болевский, Изв. РАН, сер. физ. **73**, 666 (2009)
[Bull. Russ. Acad. Sci., Physics **73**, 628 (2009)].

9. C. Zhang and D.-M. Mei, Phys. Rev. D **90**, 122003 (2014).

10. M. Aglietta et al., in *Proc. of the XXVI ICRC*, Salt Lake City, **2** (1999), p. 44, hep-ex/9905047.

11. H. Menghetti on behalf of the LVD Collaboration, Nuovo Cim. C **29**, 345 (2006).

12. А. С. Мальгин, Дисс. ... докт. физ.-матем. наук, ИЯИ РАН, Москва (2018).

13. S. Abe et al., Phys. Rev. C **81**, 025807 (2010).

14. J. Bellini et al. (the Borexino Collaboration), JCAP **08**, 049 (2013).

15. E. P. An et al., Phys. Rev. D **97**, 052009 (2018).

16. В. В. Алексеенко, Д. Д. Джаппуев, В. А. Козыри-
вский и др., Изв. РАН, сер. физ. **71**, 1075 (2007)
[V. V. Alekseenko, D. D. Dzhabpuev, V. A. Kozyariv-
sky et al., Bull. Russ. Acad. Sci., Physics **71**, 1047
(2007)].

17. В. В. Алексеенко, Ю. М. Гаврилюк, Д. М. Громуш-
кин и др., Физика Земли **45**(8), 91 (2009)
[V. V. Alekseenko, Yu. M. Gavriilyuk, D. D. Dzhap-
puev et al., Izv. Phys. Solid Earth **45**(8), 709 (2009)].

18. Ю. В. Стенькин, В. В. Алексеенко, Д. М. Громуш-
кин и др., ЖЭТФ **151**, 845 (2017) [Yu. V. Stenkin,
V. V. Alekseenko, and D. M. Gromushkin, JETP **124**,
718 (2017)].

19. H. Wulandari, J. Jochum, W. Rau, and F. von Fei-
litzsch, Astropart. Phys. **22**, 313 (2004).

20. G. Bari, M. Basile, G. Bruni, G. Cara Romeo,
A. Castelvetti, L. Cifarelli, A. Contin, C. Del Papa,
P. Giusti, G. Iacobucci, G. Maccarrone, T. Massam,
R. Nania, V. O'Shea, F. Palmonari et al., Nucl.
Instr. Meth. Phys. Res. A **264**, 5 (1988).

21. P. Antonioli, R. T. Fienberg, F. Fleurot, Y. Fukuda,
W. Fulgione, A. Habig, J. Heise, A. B. McDonald,
C. Mills, T. Namba, L. J. Robinson, K. Scholberg,
M. Schwendener, R. W. Sinnott, B. Stacey, Y. Suzuki
et al., New J. Phys. **6**, 114 (2004).

22. N. Yu. Agafonova et al. (LVD Collaboration),
Astrophys. J. **802**, 47 (2015).

23. Н. Ю. Агафонова, О. Г. Рязжская, от имени колла-
борации LVD, ЯФ **85**, 70 (2022) [N. Yu. Agafonova
and O. G. Ryazhskaya, Phys. Atom. Nuclei **85**, 79
(2022)].

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. П. Лаверов, М. В. Шумилин, И. В. Мельников, И. А. Лучин, *Справочник геолога по поискам и разведке месторождений урана*, Недра, Москва (1989).
2. В. И. Баранов, Н. А. Титаева, *Радиогеология*, Изд-во Московского университета (1973).
3. E. V. Bugaev, A. Misaki, V. A. Naumov, T. S. Sinegovskaya, S. I. Sinegovsky, and N. Takahashi, Phys. Rev. D **58**, 054001 (1998).
4. N. Agafonova et al. (LVD Collaboration), Phys. Rev. D **100**, 062002 (2019).
5. N. Yu. Agafonova (on behalf of the LVD Collaboration), arXiv:1701.04620; *XXV ECRS 2016 Proceedings — eConf C16-09-04.3*.
6. J. Klinger and V. A. Kudryavtsev, Phys. Rev. Lett. **114**, 151301 (2015).
7. B. Armbruster et al. (KARMEN Collaboration), Phys. Rev. D **65**, 112001 (2002).
8. Н. Ю. Агафонова, В. В. Бояркин, В. Л. Дадькин, Е. А. Добрынина, Р. И. Еникеев, В. В. Кузнецов, А. С. Мальгин, О. Г. Рязжская, В. Г. Рясный,

24. Н. Ю. Агафонова, В. А. Алексеев, Е. А. Добрынина, В. В. Кузнецов, А. С. Мальгин, О. Г. Рязская, В. Ф. Якушев, Препринт №1071/2001 ИЯИ РАН, Москва (2001).
25. Е. А. Добрынина, Дипломная работа, МГУ им. М. В. Ломоносова, физ. фак., каф. космических лучей и физики космоса, Москва (2001).
26. Н. Ю. Агафонова, В. В. Ашихмин, Е. А. Добрынина, Р. И. Еникеев, А. С. Мальгин, О. Г. Рязская, Н. А. Филимонова, И. Р. Шакирьянова, В. Ф. Якушев, коллаборация LVD, Изв. РАН., сер. физ. **85**, 1661 (2021) [N. Yu. Agafonova, V. V. Ashikhmin, E. A. Dobrynina, R. I. Enikeev, A. S. Malgin, O. G. Ryazhskaya, N. A. Filimonova, I. R. Shakyriyanova, V. F. Yakushev, and the LVD Collaboration, Bull. Russ. Acad. Sci., Physics **85**, 1320 (2021)].
27. Н. Ю. Агафонова, Е. А. Добрынина, Н. А. Филимонова, от имени коллаборации LVD, Вестник Московского Университета, сер. 3, физика, астрономия **78** (1), 2310202 (2023).
28. G. Bruno, PhD Thesis Univ. Degli Studi di L'Aquila, L'Aquila (2012).
29. P. Richon, F. Perrier, E. Pili, and J. Sabroux, Geophys. J. Int. **176**, 683 (2009).
30. A. Eff-Darwich, C. Martín, M. Quesada, J. de la Nuez, and J. Coello, Geophys. Res. Lett. **29**, 2069 (2002).
31. A. Eff-Darwich, R. Vinas, V. Soler, J. de la Nuez, and M. L. Quesada, Radiat. Meas. **43**, 1429 (2009).
32. Н. Ю. Агафонова, В. В. Ашихмин, Е. А. Добрынина, Р. И. Еникеев, А. С. Мальгин, К. Р. Рудаков, О. Г. Рязская, И. Р. Шакирьянова, В. Ф. Якушев, Изв. РАН, сер. физ. **83**, 673 (2019) [N. Y. Agafonova, V. V. Ashikhmin, E. A. Dobrynina, R. I. Enikeev, A. S. Malgin, K. R. Rudakov, O. G. Ryazhskaya, I. R. Shakiyanova, and V. F. Yakushev, Bull. Russ. Acad. Sci., Physics **83**, 614 (2019)].