

ЛУННО-МЕСЯЧНЫЕ ВАРИАЦИИ ФОНОВЫХ ГАММА-КВАНТОВ, ИЗМЕРЕННЫХ НА LVD

© 2024 г. Н. Ю. Агафонова^{1)*}, В. В. Ашихмин¹⁾, Е. А. Добрынина^{1)**}, Р. И. Еникеев¹⁾,
Н. А. Филимонова¹⁾, И. Р. Шакирьянова¹⁾, В. Ф. Якушев¹⁾
(от имени коллаборации LVD^{***})

Поступила в редакцию 02.09.2023 г.; после доработки 02.09.2023 г.; принята к публикации 02.09.2023 г.

По данным Детектора Большого Объема (LVD), расположенного в подземной лаборатории Гран Сассо (Италия), обнаружена модуляция концентрации радиоактивного газа радон от естественной радиоактивности грунта, связанная с лунно-месячными циклами. Фаза подъема приходится на дни полнолуния. Амплитуда вариаций варьируется от 0.5 до 0.8%.

DOI: 10.31857/S0044002724010047, EDN: KEGDEU

1. ВВЕДЕНИЕ

В эксперименте DAMA/LIBRA лаборатории Гран Сассо (Италия) наблюдаются сигналы от взаимодействия темной материи в сцинтилляторе NaI(Tl) [1].

Тяжелые частицы темной материи, очень слабо взаимодействующие с веществом, — вимпы (WIMP — weakly interacting massive particles) — образуют облако вокруг нашей галактики. Солнечная система, двигаясь по галактической орбите сквозь газ вимпов, должна чувствовать встречный “вимповый ветер”. Так как Земля движется вокруг Солнца, то мы, находясь на Земле, будем чувствовать то более сильный (максимум — 2 июня), то более слабый (минимум — 2 декабря) встречный поток вимпов с периодом один год.

Помимо движения Земли гравитационные эффекты вращения Земли, Солнца и Луны могут быть причиной вариаций разных частиц, регистрируемых под землей. Сезонно-годовые вариации мюонов под землей были обнаружены достаточно давно во многих экспериментах [2, 3] и в современных измерениях

[4–9]. Вследствие движения Земли вокруг Солнца годовые вариации связаны с изменением поглощения и длины свободного пробега вторичных частиц в земной атмосфере из-за изменения метеорологических условий над пунктом наблюдения (температурный и барометрический эффекты) [10]. Суточные вариации наблюдались в мюонах на эксперименте в БНО [11]. Лунно-месячные вариации тепловых нейтронов на уровне моря были получены в работах [12, 13]. Эти гравитационные эффекты в измерениях мюонов и адронов имеют одинаковый источник и включают несколько гармонических процессов, которые появляются в виде сложной модуляции суммарного гравитационного потенциала Луны и Солнца и имеют разную периодичность. Они включают периоды, начиная от лунной суточной и полусуточной гармоник и заканчивая движением узлов лунной орбиты с периодом примерно 18.6 лет [14]. Приливное влияние Луны в 2.17 раз превышает солнечное. Для разных географических координат вклады различных частот гармоник в приливной потенциал различны.

Установка LVD, находящаяся в подземном зале лаборатории Гран Сассо на средней глубине

¹⁾Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия.

*E-mail: Agafonova@inr.ru

**E-mail: Dobrynina@inr.ru

***LVD Коллаборация: 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^{2),3)}, R. Persiani⁴⁾, I. A. Pless¹⁰⁾, O. G. Ryazhskaya¹⁾, G. Sartorelli⁴⁾, I. R. Shakiryanova¹⁾, M. Selvi⁴⁾, G. C. Trinchero^{2),3)}, C. F. Vigorito²⁾, V. F. Yakushev¹⁾, and A. Zichichi^{4),7)}.

¹⁾Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

²⁾Department of Physic, University of Turin and INFN-Turin, 10125, Turin, Italy.

³⁾Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF), Osservatorio Astrofisico di Torino, 10025, Turin, Italy.

⁴⁾University of Bologna and INFN-Bologna, 40127, Bologna, Italy.

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

⁶⁾New York University Abu Dhabi, 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⁾Massachusetts Institute of Technology, 02139, Cambridge, USA.

$H = 3650$ м в.э. ($47^{\circ}27'$ с.ш., $13^{\circ}34'$ в.д.), способна регистрировать нейтрино от гравитационных коллапсов звездных ядер в нашей галактике [15], атмосферные мюоны и продукты их взаимодействия в веществе детектора [16, 17], нейтроны, гамма-кванты и чувствительна к разного рода их вариациям.

На LVD получена самая долгая (24 г.) серия сезонно-годовых вариаций мюонов $\delta N_{\mu} = (1.41 \pm 0.03)\%$ [18] со средней энергией 280 ГэВ. Измерены сезонно-годовые вариации мюон-индуцированных нейтронов $\delta N_n = (7.7 \pm 0.8)\%$, максимум модуляции которых совпадает с фазой, а также вариаций интенсивности мюонов (в начале июля) [19]. Нейтроны от мюонов в LVD регистрируются по запаздывающим гамма-квантам с энергией от 0.5 до 12 МэВ от захватов нейтронов ядрами железа или протонами сцинтиллятора, после прохождения мюона ($\tau \sim 150\text{--}180$ мкс). Мюоны генерируют разное количество нейтронов летом и зимой вследствие изменения средней энергии мюонов в верхних слоях атмосферы из-за ее расширения летом и сжатия зимой [20].

В ходе изучения низкоэнергетического фона детектора по данным 2001–2008 гг. получены годовые вариации гамма-квантов от распада радона в атмосфере экспериментального зала $\delta N_{\gamma} = (4 \pm 2)\%$ [21]. В недавних работах [22, 23] на LVD были обнаружены техногенные недельные и суточные вариации скорости счета гамма-квантов.

Целью этой работы является нахождение лунно-месячных вариаций гамма-квантов от естественной радиоактивности под землей с помощью детектора LVD.

2. АНАЛИЗ ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТА LVD

Детектор Большого Объема (LVD) представляет собой железно-сцинтилляционную установку размерами $22.7 \times 13.2 \times 10$ м³, состоящую из 840 полторакубовых ($1 \times 1.5 \times 1$ м³) счетчиков, заполненных жидким сцинтиллятором C_nH_{2n} , $n = 9.6$. Основной реакцией взаимодействия нейтрино в веществе детектора является реакция обратного бета-распада, в которой электронное антинейтрино взаимодействует с протоном, образуя позитрон и нейтрон ($\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$). Пороговая энергия для регистрации позитрона $E_{\text{НЕТ}} = 4$ МэВ. Нейтроны

регистрируются благодаря гамма-квантам, рожденным после их захвата веществом детектора. Пороговая энергия регистрации таких гамма-квантов составляет $E_{\text{ЛЕТ}} = 0.5$ МэВ. Подробно конструкция детектора и методика поиска нейтрино от гравитационного коллапса ядра звезды описана в [15, 24].

Фон эксперимента LVD в низкоэнергетическом диапазоне — это естественная радиоактивность — распад атомных ядер в грунте, окружающем детектор, и в материалах конструкции. Постоянное гамма-излучение можно оценить моделированием Монте-Карло или измерить гамма-спектрометрами. Однако в воздухе подземного зала присутствует радиоактивный газ радон, его концентрация не постоянна и зависит от многих факторов, например, от влажности, давления, вентиляции в помещении, вибрации грунта, приливов. Существуют равновесная и переменная составляющие радона под землей.

Известно, что гамма-кванты от дочерних ядер радона имеют энергию от 0.5 до 2.5 МэВ (основным источником является висмут ^{214}Bi). Эти гамма-кванты непрерывно регистрируются всеми счетчиками LVD в течение 10 с каждые 10 мин. Чтобы измерять только гамма-кванты от дочерних ядер радона и определять, в какой-то степени следует экранироваться от естественной радиоактивности из грунта, мы используем в анализе только внутренние счетчики детектора LVD. Формируются непрерывные временные ряды скорости счета гамма-квантов, которые при среднем уровне 45 отсчетов на счетчик в секунду имеют вариации различной природы [23]. Детально методика и чувствительность метода описаны в [25].

Мы ассоциируем переменную часть временных рядов C_{Rn} с вариациями концентрации радона в подземном помещении. Корреляция данных LVD и радиометра радона (радонометра) показана в [26]. Быстрые изменения этой составляющей мы называем “радоновыми пиками LVD”. Они имеют пиковую форму с нарастанием в течение нескольких часов и быстрым спадом около 3 ч, который соответствует времени (τ) выдува воздуха работающей вентиляцией в зале [27]. Плавные вариации, имеющие техногенное или гравитационное происхождение, имеют другую структуру, не пиковую форму. Пример временного ряда скорости счета гамма-квантов $C_{\text{Rn}}(t)$ [имп/сч/с] в LVD показан на рис. 1.

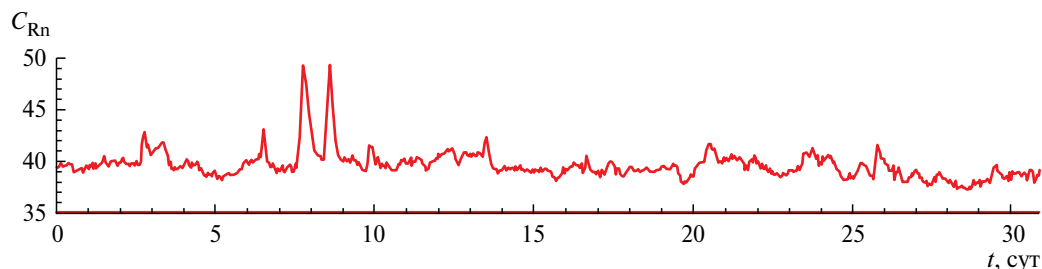


Рис. 1. Пример временных рядов LVD за январь 2020 г.

3. ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ВАРИАЦИИ

Для нахождения периодических вариаций во временных рядах обычно используют преобразование Фурье и анализ Ломба—Скаргла [28, 29]. Однако из-за нерегулярной выборки и большого “шума” во временных рядах LVD, связанных с “радоновыми пиками”, эти методы не дали значимых результатов при поиске лунно-месячных вариаций. В некоторые годы были видны различные гармонические периоды в районе 27–30 сут, в некоторых их не было.

Мы используем метод наложения эпох, который дает хорошие результаты при известном периоде. Синодический лунно-месячный период (промежуток между одинаковыми фазами луны) составляет 29.53 земных суток. Другие лунные периоды — аномалистический (27.55 сут), сидерический, или звездный (27.32 сут), драконический (27.22 сут) — вносят искажения в поиск вариаций, связанных с максимальными приливными эффектами. Поэтому, фиксируя период около 29.5 сут, мы будем выделять самую сильную модуляцию временного ряда по гармоническому закону для определения амплитуды и фазы.

3.1. Метод наложения эпох I

В этом методе, начиная с выбранной даты, например 1 января 2004 г., каждому часу присваивается номер от 0 до конца эпохи в 708 ч ($708/24 = 29.5$ сут). Затем начинается новая эпоха, которая также длится 708 ч, и так до конца

временного ряда. Для анализа мы использовали статистику за 18 лет в 6588 сут = 158118 ч, в которую укладывается 223 эпохи по 708 ч. Потом суммируются данные с одинаковыми часами в эпохе и делятся на число значений, записанных в этот час.

Результат метода наложения лунно-месячных эпох показан на рис. 2. Приведены два вида гистограмм для одного и того же набора данных: на рис. 2, *a* — скорость счета LVD, деленная на среднее $C_{Rn} / \langle C_{Rn} \rangle$ с бином 24 ч, а на рис. 2, *б* — данные в единицах скорости счета C_{Rn} (имп/сч/с) с бином, равным 1 ч.

Мелкомасштабные флуктуации скорости счета (см. рис. 2, *б*) не влияют на плавный гармонический вид гистограммы длительностью лунный месяц и не влияют на определение амплитуды и фазы модуляции.

Аппроксимируя распределения законом $N_m(t) = A + [\delta C_{Rn} / \langle C_{Rn} \rangle] \cos(2\pi(t - \varphi_m)/T)$ и принимая $A = 1$, $T = 29.5$ сут (см. рис. 2, *a*) и $A = \langle C_{Rn} \rangle$, $T = 708$ ч (см. рис. 2, *б*), мы получили значения амплитуды модуляции $\delta C_{Rn} / \langle C_{Rn} \rangle = (0.8 \pm 0.15)\%$ и фазы $\varphi_m = 8 \pm 3$ (максимум кривой), соответствующей дню полнолуний (7-е сутки с 01.01.2004). Фаза лунно-месячных вариаций приходится примерно на полнолуние и получается одинаковой для любого периода наблюдений из статистики 01.01.2004–31.12.2021. Например, для данных с 2009 г. полнолуние приходится на 11-е сутки с начала 2009 г., для данных с 2011 г. полнолуние приходится на 20-е сутки с начала 2016 г. Аппроксимация гистограмм дает фазу φ_m , примерно совпадающую

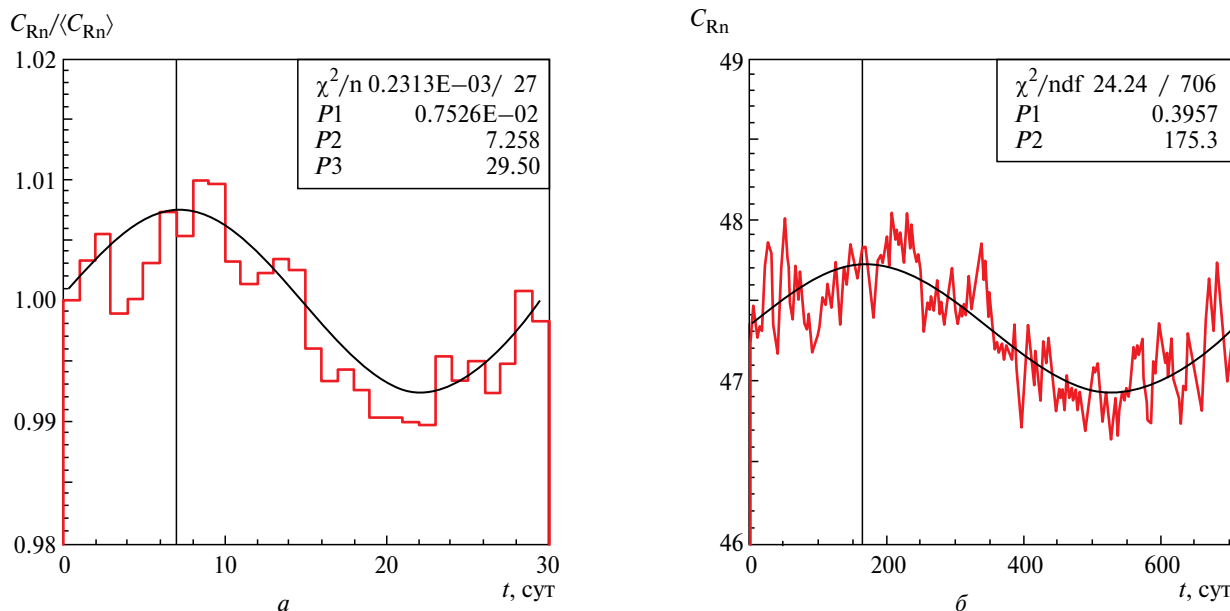


Рис. 2. Лунно-месячные вариации скорости счета гамма-квантов C_{Rn} за период 01.01.2004–31.12.2021; *a* — деленные на среднее в год (бин 24 ч); *б* — в абсолютных единицах (бин 1 ч). Кривая — аппроксимация гармонической функцией $a - f(t) = 1 + P1 \cos(2\pi(t - P2)/P3)$, $б - f(t) = 47.33 + P1 \cos(2\pi(t - P2)/708)$ (эпоха $T = 708$ ч (см. текст)). Результаты фитирования (параметры $P1$, $P2$, $P3$) приведены в верхнем углу гистограмм. Вертикальная линия — день полнолуния от начала 2004 г.

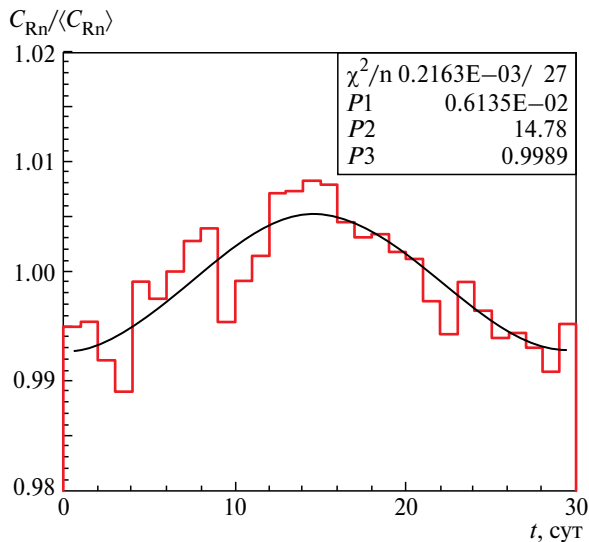


Рис. 3. Лунно-месячные вариации скорости счета гамма-квантов $\delta C_{Rn} / \langle C_{Rn} \rangle$, данные, приведенные на среднее с бином 24 ч за период 01.01.2009–31.12.2021. Кривая — аппроксимация гармонической функцией $f(t) = P_3 + P_1 \cos(2\pi(t - P_2)/T)$, где $T = 29.5$ сут. Результат фитирования (параметры P_1, P_2, P_3) приведен в верхнем углу гистограммы. Полнолуние приходится на 11-е сутки с начала 2009 г.

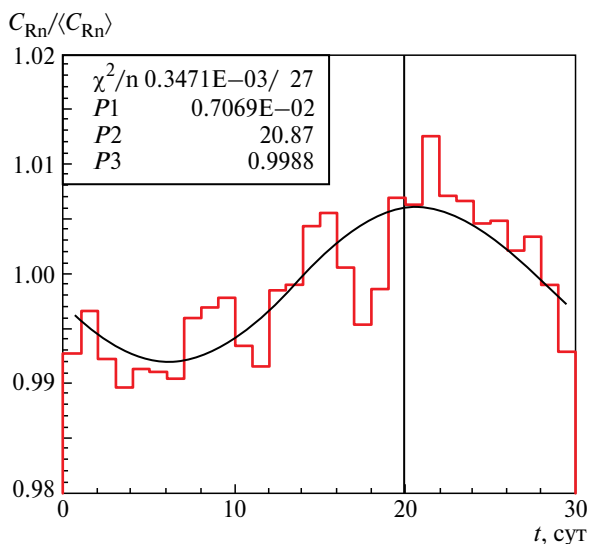


Рис. 4. Лунно-месячные вариации скорости счета гамма-квантов $\delta C_{Rn} / \langle C_{Rn} \rangle$, данные, приведенные на среднее с бином 24 ч за период 01.01.2011–31.12.2021. Кривая — аппроксимация гармонической функцией $f(t) = P_3 + P_1 \cos(2\pi(t - P_2)/T)$, где $T = 29.5$ сут. Результат фитирования (параметры P_1, P_2, P_3) приведен в верхнем углу гистограммы. Полнолуние приходится на 20-е сутки с начала 2011 г.

с полнолунием 15 ± 3 и 21 ± 3 для данных с 2009 г. (рис. 3) и с 2011 г. (рис. 4) соответственно.

Эпоха 708 ч (29.5 сут) была выбрана как наиболее вероятная для поиска лунно-месячных вариаций. Для других периодов, в диапазоне от 27 до

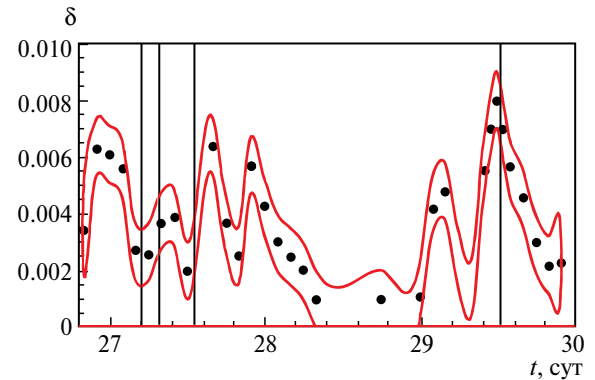


Рис. 5. Зависимость относительной амплитуды модуляции от выбранной эпохи (статистика 01.01.2004–31.12.2021). Кривыми показаны диапазоны ошибок определения амплитуды модуляции. Линиями отмечены периоды — 27.22; 27.32; 27.55; 29.53.

30 сут, мы проверили нашу методику поиска модуляции, используя такую же процедуру фиксирования эпохи. Для статистики 2004–2021 гг. построены вариации скорости счета с различными эпохами по методу, описанному выше. Зависимость относительной амплитуды модуляции $\delta C_{Rn} / \langle C_{Rn} \rangle$ от выбранных эпох показана на рис. 5. Самая большая относительная амплитуда $\delta \approx 0.8\%$ соответствует 708 ч = 29.5 сут (синодический период). Меньшие амплитуды (0.6%) в районе 27–28 сут близки к другим гармоникам лунных периодов (аномалистическому и сидерическому). Также в частотном спектре присутствуют другие колебательные процессы, источником которых является техническая активность обслуживающего эксперименты персонала (периоды рабочей недели и рабочих суток). Возникают резонансные эффекты (“биения”) и усиление колебаний в районе 28 сут (4×7 сут) и 27 сут (кратный периоду 9 сут). Период ~ 9 сут обсуждался в работе [14] как факт взаимодействия гармоник гравитационного прилива с собственными колебательными модами природных систем в теории автоколебательных систем и динамического хаоса [30].

Фаза лунно-месячных вариаций, самого большого пика (для гармоника 29.5), соответствует дню полнолуния с задержкой на 3–5 сут.

3.2. Метод наложения эпох II

Для этого метода выделяются лунные месяцы (синодического периода) и фиксируются даты полнолуний. Отсчитывая 14 сут вправо и влево по временной шкале от дней полнолуния, формируются данные для каждого лунного месяца. Таким образом, образуются временные ряды по 29 сут с полнолунием, приходящимся на 15-е сутки лунного месяца. Затем данные соответствующих суток суммируются и усредняются.

Мы разделили нашу статистику 2009–2019 гг. на два периода: 1) дневные часы — с 08.00 до 20.00

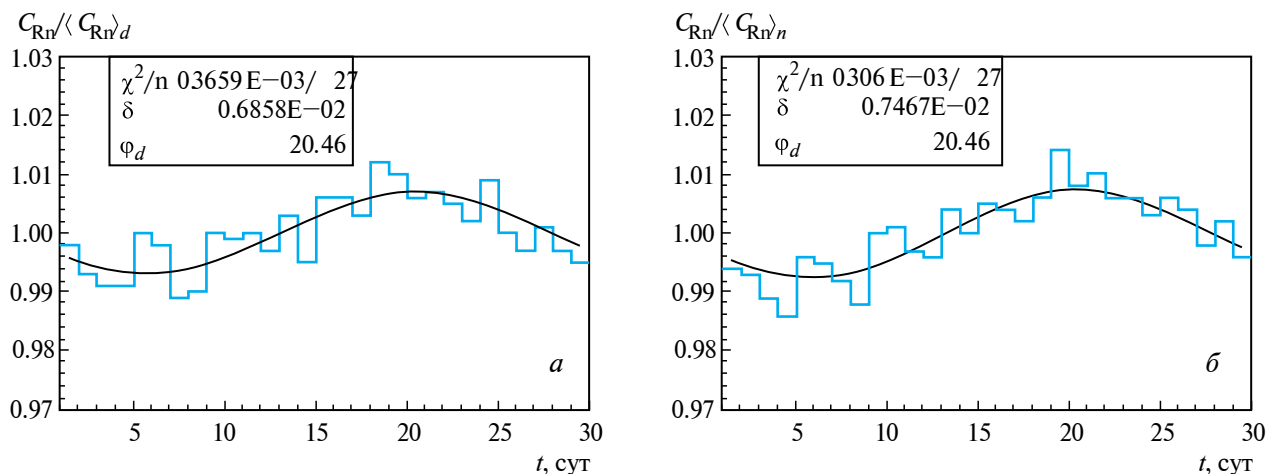


Рис. 6. Лунно-месячные вариации $C_{Rn} / \langle C_{Rn} \rangle$ концентрации радона: а — в дневное время; б — в ночное время.

и 2) ночные часы — с 23.00 до 06.00. Данной процедурой мы хотели проверить, как влияют на лунно-месячную вариацию обнаруженные нами ранее (см. в [22, 23]) техногенные суточные вариации, связанные с вентиляцией в зале и работой сотрудников на экспериментах. Техногенные суточные вариации C_{Rn} имеют двугорбую структуру: повышение скорости счета с начала рабочего времени до обеда к 13.00, затем провал на два часа, опять повышение к 16.00 и плавный спад к 22.00. В выходные дни скорость счета C_{Rn} постоянна, без вариаций, что говорит о техногенном характере модуляций.

На рис. 6, а, б представлены лунно-месячные вариации с эпохой один лунный месяц. На 15 бин гистограммы всегда приходится полнолуние. Данные C_{Rn} нормированы на среднее значение в год. Аппроксимация (фитирование) распределения законом $f(t) = 1 + [\delta C_{Rn} / \langle C_{Rn} \rangle] \cos(2\pi(t - \phi)/T)$, где период $T = 29.5$ сут, дала амплитуду модуляции $\delta C_{Rn} / \langle C_{Rn} \rangle_d = \delta C_{Rn} / \langle C_{Rn} \rangle_n = 0.7\%$ и фазу (ϕ), сдвинутую относительно полнолуния на ~ 5 сут, для дневных и ночных периодов одинаково. Метод наложения эпох дал одинаковый результат для дневного и ночного периода набора данных. Это означает, что активность людей в экспериментальном зале, которая создает техногенные пики (возмущения), не мешает наблюдать лунно-месячные вариации гамма-квантов, регистрируемые LVD.

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За последние несколько десятилетий были сделаны попытки измерить аномальные эманации подземных газов в сейсмоопасных регионах мира, в частности, гелия, радона, водорода и углекислого газа [31]. Среди них наиболее информативен в качестве предвестника землетрясения — радон. Измерения радона в почве, грунтовых водах и в атмосферном воздухе показали, что его пространственные и временные вариации могут

предоставить информацию о геодинамических событиях. Эта информация представляет интерес при прогнозировании тектонических событий [32, 33].

Связь между напряженным состоянием горных пород и вариациями выделения радона была предложена и подтверждена несколькими лабораторными экспериментами, например [34, 35].

По данным детектора LVD, который регистрирует гамма-кванты от распада радона в атмосфере зала в непрерывном режиме каждые 10 мин, обнаружена модуляция концентрации радона, связанная с лунно-месячными циклами. Эта модуляция обусловлена приливной деформацией земной коры. Локально различные поля напряжений могут быть следствием изменения порового давления, связанным с подъемом глубинных потоков в земной коре. Другие возможные причины вариаций, такие как температура, атмосферное давление в масштабах недели — месяца, а также резкие перепады суточного давления не коррелируют с данными LVD по скорости счета гамма-квантов, а следовательно, и с выбросами радона [36].

Обнаружена гармоника, соответствующая главному синодическому лунно-месячному периоду 29.53 сут. Также проявляются гармоники с периодами около 27.0 сут (кратные 9 сут) и около 28 сут (кратные 7 сут), которые являются следствием суммарного воздействия нескольких колебательных мод, возникающих при наличии периодических колебаний различной природы в земной коре.

Фаза (максимум амплитуды) синодического периода приходится на день полнолуния в пределах ошибок. Амплитуда вариаций в разные годы варьируется от 0.5 до 0.8%. Такой разброс имеет физический характер и связан с изменением интенсивности выхода радона из пор горных пород в различные периоды измерений. В работе [37] было показано, что землетрясения и тектонические подвижки могут изменить поровое давление

и уменьшить эффективное напряжение на плоскости разлома, что даст меньший отклик при измерении тектонических газов.

Также следствием проведенного нами анализа являются указания на то, что максимум фазы лунно-месячных вариаций гамма-квантов от распада радона, измеренных LVD, сдвинут после полнолуния на 1–5 сут. Похожие указания есть в работе [13].

Изменения напряженно-деформируемого состояния земной коры, вызванные приливными силами, приводят к миграции газов вдоль трещинных зон. Существует мнение, что радоновые аномалии в зонах тектонических нарушений являются результатом сравнительно быстрого объемного переноса газов через разломы и трещины из более глубоких пород [38]. В этом случае радон может выйти раньше и/или во время землетрясения. Исследуя форму радоновых пиков на LVD и временной характер их появления, мы надеемся найти различие в механизмах распространения геогазов при подготовке землетрясений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. Bernabei *et al.* (DAMA Collab.), arXiv: 0804.2741; arXiv: 2209.00882.
2. N. Sherman, *Phys. Rev.* **93**, 208 (1954).
3. A. G. Fenton, R. M. Jacklyn, and R. B. Taylor, *Nuovo Cimento B* **22**, 285 (1961).
4. M. Ambrosio *et al.* (MACRO Collab.), *Phys. Rev. D* **67**, 042002 (2003).
5. F. P. An *et al.* (Daya Bay Collab.), *JCAP* **01**, 001 (2018).
6. P. Desiati *et al.* (Ice Cube Collab.), in *Proceedings of the 32nd International Cosmic Ray Conference, Beijing, 2011*.
7. M. Agostini *et al.* (Borexino Collab.), *JCAP* **02**, 046 (2019); P. Adamson *et al.* (MINOS Collab.), *Phys. Rev. D* **90**, 012010 (2014).
8. N. Agafonova *et al.* (OPERA Collab.), *JCAP* **10**, 003 (2019); arXiv: 1810.10783[hep-ex].
9. Л. И. Дорман, *Метеорологические эффекты космических лучей* (Наука, Москва, 1972).
10. Yu. M. Andreyev, A. E. Chudakov, V. A. Kozyarivsky, V. Ya. Poddubny, T. I. Tulupova, and A. V. Voevodsky, in *Proceedings of the 21st ICRC, Adelaide, 1990*, SH 8.2–10, p. 88.
11. В. В. Алексеенко, Д. Д. Джаппуев, В. А. Козырявский, А. У. Куджаев, В. В. Кузьминов, О. И. Михайлова, Ю. В. Стенькин, *Изв. РАН. Сер. физ.* **71**, 1075 (2007).
12. В. В. Алексеенко, Ю. М. Гаврилюк, Д. М. Громушкин, Д. Д. Джаппуев, А. У. Куджиев, В. В. Кузьминов, О. И. Михайлова, Ю. В. Стенькин, В. И. Степанов, *Физика Земли* **8**, 91 (2009) [*Phys. Solid Earth*. **45**, 709 (2009)].
13. Д. С. Хабитуев, Б. Г. Шпынев, А. В. Татарников, Е. С. Щеглова, *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса* **14**, 321 (2017).
14. N. Y. Agafonova, M. Aglietta, P. Antonioli, V. V. Ashikhmin, G. Badino, G. Bari, R. Bertoni, E. Bressan, G. Bruno, V. L. Dadykin, E. A. Dobrynina, R. I. Enikeev, W. Fulgione, P. Galeotti, M. Garbini, P. L. Ghia, *et al.*, *Astrophys. J.* **802**, 47 (2015).
15. Н. Ю. Агафонова, В. В. Ашихмин, Е. А. Добрынина, Р. И. Еникеев, А. С. Мальгин, О. Г. Рязская, И. Р. Шакирьянова, В. Ф. Якушев, *ЯФ* **81**, 85 (2018) [*Phys. At. Nucl.* **81**, 95 (2018)].
16. Н. Ю. Агафонова, О. Г. Рязская (от имени коллаборации LVD), *ЯФ* **85**, 70 (2022) [*Phys. At. Nucl.* **85**, 79 (2022)].
17. N. Yu. Agafonova *et al.* (LVD Collab.), *Phys. Rev. D* **100**, 062002 (2019).
18. N. Yu. Agafonova (on behalf of the LVD Collab.), arXiv: 1701.04620; in *Proceedings of the 25th European Cosmic Ray Symposium (ECRS2016), Sept. 4–9, 2016, Turin, Italy*, C16–09–04.3.
19. Н. Ю. Агафонова, А. С. Мальгин, *ЖЭТФ* **159**, 88 (2021) [*JETP* **132**, 73 (2021)]; Н. Ю. Агафонова, В. В. Ашихмин, В. Л. Дадыкин, Е. А. Добрынина, Р. И. Еникеев, А. С. Мальгин, О. Г. Рязская, И. Р. Шакирьянова, В. Ф. Якушев и коллаборация LVD, *Изв. РАН. Сер. физ.* **81**, 551 (2017) [*Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* **81**, 512 (2017)].
20. 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 и коллаборация LVD, *Изв. РАН. Сер. физ.* **83**, 673 (2019) [*Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* **83**, 614 (2019)].
21. Н. Ю. Агафонова, Е. А. Добрынина, Н. А. Филимонова, И. Р. Шакирьянова (от имени коллаборации LVD), *ЖЭТФ* **164**, 386 (2023).
22. C. 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, E. Perotto *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods. A* **264**, 5 (1988).
23. 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).
24. Gianmarco Bruno, PhD Thesis, Universit'a de L'Aquila e Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Laboratori Nazionali del Gran Sasso (2012).

25. Н. Ю. Агафонова, Е. А. Добрынина, Н. А. Филимонова (от имени коллаборации LVD), ВМУ. Серия 3. Физ. астрон. **78**, 2310202 (2023) [Moscow Univ. Phys. **78**, 27 (2023)].
26. N. Lomb, *Astrophys. Space Sci.* **39**, 447 (1976); J. Scargle, *Astrophys. J.* **263**, 835 (1982).
27. М. А. Павлейно, В. М. Ромаданов, *Спектральные преобразования в MatLab* (СПб., 2007), с. 160.
28. А. П. Кузнецов, С. П. Кузнецов, Н. М. Рыскин, *Нелинейные колебания* (Физматлит, Москва, 2002), с. 292.
29. G. Immè and D. Morelli, in *Radon as Earthquake Recursor, Earthquake Research and Analysis — Statistical Studies, Observations and Planning* (2012), p. 143–160.
30. С. В. Бирюлин, Дис. ... канд. геол.-минерал. наук, ИЗК СО РАН (Екатеринбург, 2022).
31. В. И. Уткин, А. К. Юрков, *Доклады РАН* **358**, 675 (1998); P. Tuccimei, S. Mollo, S. Vinciguerra, M. Castelluccio, and M. Soligo, *Geophys. Res. Lett.* **37**, L05305 (2010); I. Hirose, I. Kawasaki, S. Takemoto, and Y. Tamura, *J. Geod. Soc. Jpn.* **49**, 227 (2003).
32. Н. Ю. Агафонова, В. В. Ашихмин, Е. А. Добрынина, Р. И. Еникеев, А. С. Мальгин, О. Г. Ряжская, Н. А. Филимонова, И. Р. Шакирьянова, В. Ф. Якушев и коллаборация LVD, *Изв. РАН. Сер. физ.* **85**, 1661 (2021) [*Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* **85**, 1320 (2021)].
33. F. H. Weinlich, E. Faber, A. Boušková, J. Horálek, M. Teschner, and J. Poggenburg, *Tectonophysics*. **421**, 89 (2006).
34. В. И. Уткин, А. К. Юрков, *Геология и геофизика* **51**, 277 (2010).

LUNAR-MONTHLY VARIANCES IN THE BACKGROUND GAMMA-QUANTA MEASURED AT THE LVD

**N. Yu. Agafonova¹⁾, V. V. Ashikhmin¹⁾, E. A. Dobrynina¹⁾, R. I. Enikeev¹⁾, N. A. Filimonova¹⁾,
I. R. Shakiryanova¹⁾, V. F. Yakushev¹⁾, on behalf of the LVD collaboration**

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

According to the Large Volume Detector (LVD), located in the underground laboratory of Gran Sasso, Italy, a modulation of the concentration of the radioactive gas radon from the natural radioactivity of the rock, associated with lunar-monthly cycles, was detected. The rising phase falls on the days of the full moon. The amplitude of variations varies from 0.5 to 0.8%.