

УДК 539.16

ИЗУЧЕНИЕ ВАРИАЦИЙ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ФОНА С ПОМОЩЬЮ ПОДЗЕМНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА LVD

© 2019 г. Н. Ю. Агафонова¹, *, В. В. Ашихмин¹, Е. А. Добрынина¹, Р. И. Еникеев¹, А. С. Мальгин¹, К. Р. Рудаков², О. Г. Ряжская¹, И. Р. Шакирьянова¹, В. Ф. Якушев¹ и коллаборация LVD

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Национальный исследовательский университет “МЭИ”, Москва, Россия

*E-mail: Agafonova@inr.ru

Поступила в редакцию 15.09.2018 г.

После доработки 06.11.2018 г.

Принята к публикации 28.01.2019 г.

Детектор большого объема (LVD) в Национальной лаборатории Гран Сассо работает с 1992 года по программам поиска всплесков нейтринного излучения от коллапсов звездных ядер и изучения проникающей компоненты космических лучей и источников фона при регистрации редких событий. В работе представлен анализ низкоэнергетического фона ($E > 0.5$ МэВ) в подземном эксперименте LVD.

DOI: 10.1134/S0367676519050041

ВВЕДЕНИЕ

Известно о радон-нейтронных приливных вариациях в земной коре, связанных с лунными периодами и имеющих гравитационное происхождение [1, 2]. В работе [2] 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 [3] были обнаружены спорадические увеличения потока тепловых нейтронов, которые объясняются адвекцией грунтовых газов (эффект барометрической откачки радона). В Лаборатории Гран Сассо (LNGS, Италия), в зале А, где находится установка LVD – Детектор Большого Объема, температура и влажность мало изменяются. Работа приточной вентиляции и близость транспортного туннеля создают условия для колебаний концентрации радона в течение суток. Толщина грунта над залами Лаборатории более 3 км в. э. обуславливает ультранизкий уровень фонового излучения, идеально подходящий для экспериментов по нейтринной физике и изучению темной материи.

1. ОПИСАНИЕ ДЕТЕКТОРА БОЛЬШОГО ОБЪЕМА

Установка LVD содержит около 1000 тонн жидкого сцинтиллятора (C_nH_{2n} , $\bar{n} \approx 9.6$) и около 1000 тонн железа [4]. Сцинтиллятором заполнено

840 счетчиков объемом 1.5 м^3 каждый. Счетчик имеет форму параллелепипеда ($100 \times 100 \times 150$ см) и сделан из нержавеющей стали толщиной 4 мм. На верхней грани установлены три фотоумножителя, включенные на совпадение. Счетчики, по восемь, помещены в металлические модули-контейнеры (толщина стенок 20 мм), из которых формируются вертикальные колонны. Пять колонн объединены в башню. Установка состоит из трех башен, в каждой по 280 счетчиков. Счетчики имеют верхний и нижний энергетические пороги регистрации ($E_{\text{НЕТ}} = 5$ МэВ и $E_{\text{ЛЕТ}} = 0.5$ МэВ).

Основными источниками фона по низкому порогу на установке LVD являются продукты естественной радиоактивности 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 окружающих горных породах, хорошо растворяется в воде и переносится подземными водами. Наиболее интенсивная эманация радона наблюдается при землетрясениях. Установка LVD регистрирует гамма-кванты от распадов дочерних ядер радона, период полураспада которого составляет 3.8 дня. Гамма-излучение создается, в основном, ядрами висмута, превращающимися в полоний за счет β -распада с характерным периодом полураспада 19.7 мин. Энергетический спектр гамма-излучения охватывает диапазон от 0.6 до 2.5 МэВ.

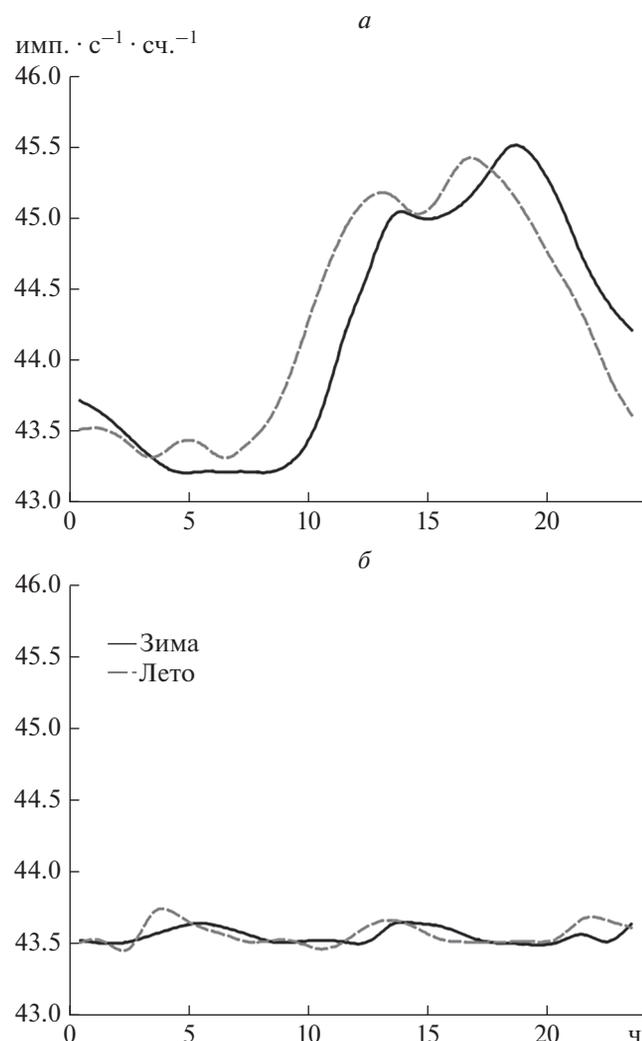


Рис. 1. Средний темп счета (имп. · с⁻¹ · сч.⁻¹) за сутки при “наложении эпох” в 2016 г. (а) рабочие дни, (б) выходные дни.

2. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

В результате анализа данных установки LVD по низкоэнергетическому порогу $E_{\text{ЛЕТ}}$ была установлена зависимость концентрации радона в подземном зале от ежедневной производственной деятельности в подземных залах лаборатории [5, 6].

Изменение концентрации радона (Rn) тесно связано с сейсмической активностью и техногенными факторами, приводящими к ускоренному выходу Rn из грунта (особенно в окружении осадочных пород). Данные, используемые для исследования фона, формируются следующим образом: каждые 10 мин все сцинтилляционные счетчики запускаются импульсом от генератора на регистрацию низкоэнергетических импульсов в течение 10 с. Для анализа отбираются только ста-

бильно работающие внутренние счетчики установки. Суммарный темп счета в герцах (Hz) нормируется на один счетчик. Чувствительность метода составляет 5% на уровне 3σ .

Методом “наложения эпох” мы получили суточные, недельные и годовые вариации темпа счета низкоэнергетических импульсов установки.

2.1. Суточные вариации

Время увеличения концентрации радона в атмосфере зала установки LVD коррелирует с рабочим временем. Ночью приточная вентиляция при закрытых воротах создает избыток давления, который уменьшает выход радона из скалы. Днем открываются ворота экспериментальных залов, давление уменьшается и радон выходит в атмосферу зала интенсивнее. Увеличение концентрации радона достигает максимума в дневное время при полном темпе счета около 45 имп. · с⁻¹ · сч.⁻¹. Минимум концентрации приходится на ночное время и на выходные дни при полном темпе счета ~43 имп. · с⁻¹ · сч.⁻¹. Минимальной концентрации соответствует постоянное равновесное (между эманацией из горной породы и воды, с одной стороны, и вентиляцией — с другой) значение около 20 Бк/м³.

Временной ход темпа счета импульсов в рабочие дни имеет два максимума, которые расположены на временной шкале около 12 и 16 ч, соответственно. В районе 14 ч наблюдается снижение темпа счета (рис. 1а, штриховая кривая). В выходные дни (суббота и воскресенье) темп счета фоновых событий имеет другой вид: отсутствуют выраженные максимумы и не наблюдается увеличение темпа счета в рабочее время (рис. 1б). Впервые на этот эффект, наблюдаемый в данных LVD, было указано в работе [5]. Ярко виден часовой сдвиг между распределениями “летних” (светлая, штриховая кривая рис. 1) и “зимних” (сплошная, черная кривая рис. 1) радоновых пиков, что объясняется часовой разницей “летнего” и “зимнего” времени (часы установки всегда показывают “зимнее” время).

2.2. Недельные вариации

На рис. 2 приведен темп счета низкоэнергетических импульсов в течение одной недели (с понедельника по воскресенье). График получен методом “наложения эпох” за 2016 год, то есть просуммированы соответствующие дни недели и часы в течение года с последующим усреднением.

Отметим, что перепады концентрации радона в выходные дни невелики, поскольку работы на экспериментах практически не проводятся и ворота в экспериментальный зал, где расположена установка LVD, остаются закрытыми. Также в выходные дни ниже интенсивность движения в

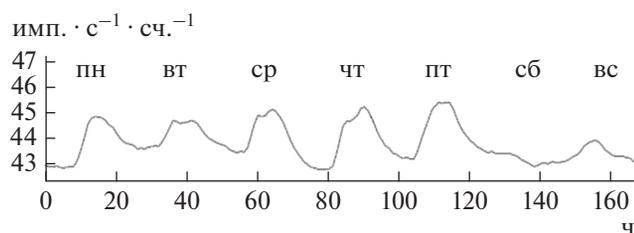


Рис. 2. Средний темп счета импульсов в секунду, приведенный на 1 счетчик (имп. · с⁻¹ · сч.⁻¹) за неделю в 2016 г., полученный методом “наложения эпох”.

транспортном туннеле большегрузных машин, вызывающих вибрацию грунта. Подобные эффекты в туннелях и подземных залах были описаны в работах [7–9]. Очевидно, что эти флуктуации могут влиять на “пиковый” характер полученных графиков.

2.3. Годовые вариации

С целью выделения долговременной составляющей вариации концентрации радона был проведен анализ данных по низкоэнергетическому порогу с 2008 по 2016 годы [10]. Данные до 2008 не включались в анализ из-за несовершенной системы вентиляции помещения. Амплитуда колебаний темпа счета $\delta N_b/N_b$ и фаза φ с достаточной точностью были установлены методом “наложения эпох”, при этом суммировались годовые данные за восемь лет наблюдений (рис. 3). При фитировании временного распределение с бином 1 месяца функцией $N_b(t) = 1 + \delta N_b/N_b \cos(2\pi(t - \varphi)/T)$ с $T = 12$ мес., были получены значения величин модуляции $\delta N_b/N_b = 4 \pm 2\%$ и фаза $\varphi = 8.1 \pm 0.4$ мес. Максимум находится в начале сентября. Так как радон переносится главным образом подземными водами, его максимальная концентрация в атмосфере зала достигается в период максимального тока воды в окружающем грунте, то есть в сентябре.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вариации концентрации радона связаны с сейсмической активностью и с техногенными факторами, приводящими к эманации радона из породы. Движение транспорта в туннеле, открытие и закрытие дверей в экспериментальном зале установки LVD влияют на концентрацию радона. Измерения вариаций темпа счета позволили разделить общий фон детектора на две компоненты:

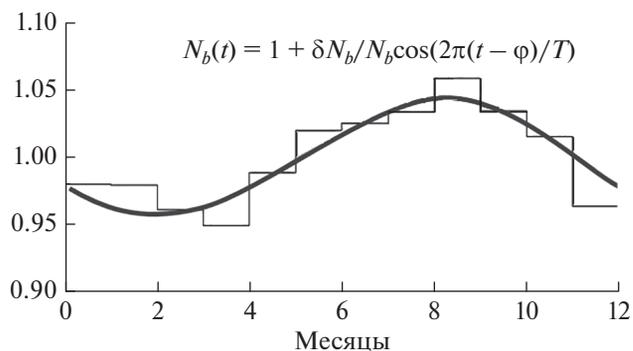


Рис. 3. Средний темп счета импульсов в течение года, полученный методом наложения эпох с 2008 по 2016 г.

переменную, связанную с вариациями потока радона, и постоянную составляющую, связанную с радиоактивностью материалов установки и породы. Максимальная концентрация радона в подземных помещениях лаборатории Гран Сассо достигается в сентябре при насыщении породы водой тающих горных ледников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеенко В.В., Джанпуев Д.Д., Козыревский В.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2007. Т. 71. № 7. С. 1075; *Alekseenko V.V., Dzhappuev D.D., Kozyarivsky V.A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2007. V. 71. № 7. P. 1047.
2. Алексеенко В.В., Гаврилюк Ю.М., Громушкин Д.М. и др. // Физика Земли. 2009. № 8. С. 91; *Alekseenko V.V., Gavrilyuk Yu.M., Dzhappuev D.D. et al. // Izv. Phys. Solid Earth.* 2009. V. 45. № 8. P. 709.
3. Стенькин Ю.В., Алексеенко В.В., Громушкин Д.М. и др. // ЖЭТФ. 2017. Т. 151. № 5. С. 845; *Stenkin Yu.V., Alekseenko V.V., Gromushkin D.M. // JETP.* 2017. V. 124. № 5. P. 718.
4. *Bari G., Bazile M., Bruni G. et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A.* 1988. V. 264. P. 5.
5. Агафонова Н.Ю., Алексеев В.А., Добрынина Е.А. и др. Препринт № 1071/2001 ИЯИ РАН, 2001.
6. *Bruno G. on behalf of the LVD Collaboration // J. Phys. Conf. Ser.* 2010. V. 203. Art. no. 012091.
7. *Richon P., Perrier F., Pili E., Sabroux J. // Geophys. J. Int.* 2009. V. 176. № 3. P. 683.
8. *Eff-Darwich A., Martin C., Quesada M. et al. // Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. P. 2069.
9. *Eff-Darwich A., Vinas R., Soler V. et al. // Rad. Meas.* 2009. V. 43. P. 1429.
10. Агафонова Н.Ю., Ашихмин В.В., Дадыкин В.Л. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 4. С. 551; *Agafonova N.Yu., Ashikhmin V.V., Dadykin V.L. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2017. V. 81. № 4. P. 512.