

УДК 539.125.5

СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ ПОТОКА НЕЙТРОНОВ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ МЮОНАМИ, И ФОНА ЕСТЕСТВЕННОЙ РАДИОАКТИВНОСТИ В ПОДЗЕМНОЙ ЛАБОРАТОРИИ ГРАН САССО

© 2017 г. Н. Ю. Агафонова*, В. В. Ашихмин, В. Л. Дадькин, Е. А. Добрынина, Р. И. Еникеев, А. С. Мальгин, О. Г. Ряжская, И. Р. Шакирьянова, В. Ф. Якушев и Коллаборация LVD

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки “Институт ядерных исследований”
Российской академии наук, Москва*

**E-mail: Natagafonova@gmail.com*

Мюоны космических лучей со средней энергией 280 ГэВ и нейтроны, генерируемые ими, регистрируются детектором LVD. В статье представлен анализ сезонных вариаций потока нейтронов на основе данных, полученных в течение 15 лет. Измерение величины сезонных вариаций удельного числа нейтронов, генерированных мюонами, позволяет определить величину вариаций средней энергии потока мюонов на глубине расположения LVD. Источником сезонных вариаций полного потока нейтронов является изменение интенсивности и средней энергии потока мюонов. В работе также представлен анализ долговременного мониторинга низкоэнергетического фона детектора LVD.

DOI: 10.7868/S0367676517040032

ВВЕДЕНИЕ

Сезонные вариации потока мюонов существуют как на уровне моря, так и под землей [1]. Эти вариации вызываются температурным и барометрическим эффектами, связанными с изменениями высоты и плотности атмосферы летом и зимой. Температурный эффект влияет на генерацию мюонов в верхних слоях атмосферы, барометрический — на выживание мюонов в атмосфере. Для мюонов больших энергий (~280 ГэВ), которые мы регистрируем под землей, наблюдается положительный температурный эффект. Это связано с тем, что больших глубин достигают главным образом мюоны от распадов пионов первого поколения генерации, число которых увеличивается при расширении атмосферы и падении ее плотности в верхних слоях (на высоте ~20 км).

Измерения вариации интенсивности мюонов на больших глубинах были выполнены в экспериментах MACRO [2], MINOS [3], AMANDA [4], LVD [5], IceCube [6], Borexino [7]. На LVD была получена амплитуда вариаций интенсивности потока мюонов $\delta I_\mu = 1.5\%$ за 8 лет наблюдений [5].

1. АНАЛИЗ НЕЙТРОННЫХ ДАННЫХ ДЕТЕКТОРА LVD

Установка LVD (Детектор большого объема) расположена в подземной лаборатории Гран Сассо (Италия) на глубине $\langle H \rangle = 3650$ м. в. э. [8]. LVD — многоцелевой эксперимент, основная задача кото-

рого — поиски нейтринного излучения от гравитационного коллапса звездных ядер. По этой программе детектор работает с 1992 г. [9]. LVD состоит из трех башен, содержащих 840 полторакубовых сцинтилляционных счетчиков расположенных на семи уровнях.

Мюоны, проходя через детектор LVD, генерируют ядерные и электромагнитные ливни, в составе которых рождаются нейтроны за счет процессов μA -взаимодействия (ядерные ливни) и γA -взаимодействия (электромагнитные ливни). Нейтроны замедляются в сцинтилляционных счетчиках и захватываются либо протонами $n + p \rightarrow d + \gamma$ с излучением γ -кванта с энергией 2.2 МэВ, либо железом $n + Fe \rightarrow Fe + \gamma$ со средней энергией ~8 МэВ. Время жизни нейтрона в сцинтилляторе детектора ~180 мкс. Триггером для регистрации нейтрона является энерговыделение мюона в детекторе более 50 МэВ. Триггер открывает временные ворота длительностью 1 мс для регистрации γ -квантов с энергией $E_\gamma > 0.5$ МэВ.

В эксперименте отбирались мюоны, пересекающие не менее двух внутренних счетчиков детектора с энерговыделением $E_{tr} > 50$ МэВ в каждом. Число нейтронов определялось в этих же счетчиках.

При анализе данных по изучению сезонных вариаций нейтронов использовалась величина N_n/N_{tr} (удельное число нейтронов), N_n — количество регистрируемых нейтронов в счетчике, N_{tr} — число триггеров в данном счетчике. Введение такой величины позволяет при определении ампли-

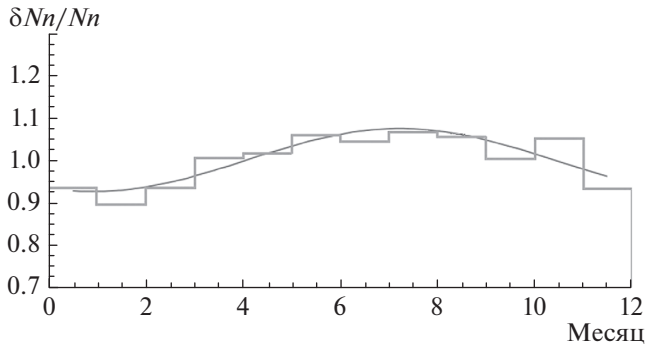


Рис. 1. Вариации удельного числа нейтронов (бин — 1 месяц с учетом количества дней в месяце).

туды вариаций не учитывать акцептанс установки, эффективность регистрации нейтронов, пробелы в данных при краткосрочных отключениях счетчиков.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АМПЛИТУДЫ ВАРИАЦИИ НЕЙТРОНОВ

Мы использовали два метода определения амплитуды вариации нейтронов: метод наложения эпох и разностный метод.

2.1. Метод наложение эпох

Были проанализированы мюонные события во внутренних счетчиках трех башен LVD за 15 лет наблюдений с 2001 по 2016 год. Амплитуду модуляции $\delta N_n/N_n$ и фазу φ с достаточной точностью можно установить методом “наложения эпох”, при этом годовые данные за 15 лет наблюдений накладываются друг на друга (рис. 1).

Определялось число мюонных триггеров на один счетчик в течение месяца ($N_\mu = N_r$), а также число нейтроноподобных импульсов (N_{tot}) с энергией 1–12 МэВ во временном интервале 50–350 мкс после триггера. Фонowymi считались импульсы (N_{bg}) с энергией 1–12 МэВ во временном интервале 450–750 мкс. Удельное число нейтронов $N_n/N_{tr} = (N_{tot} - N_{bg})/N_{tr}$ было определено для каждого месяца в период с 2001 по 2016 г.

При фитировании данных уравнением $N(t) = 1 + \delta N_n/N_n \times \cos(2\pi(t - \varphi)/T)$ для фиксированного $T = 12$ (месяцев) было получено $\delta N_n/N_n = 8 \pm 2\%$. Полученная фаза $\varphi = 7.0$ (стат.) ± 0.5 (сис.) совпадает с фазой интенсивности мюонов [5].

2.2. Разностный метод

Большая статистика позволила с хорошей точностью определить число нейтронов, рожденных мюонами в летние и зимние месяцы в течение 15 лет. Для этого использовались временные рас-

пределения нейтроноподобных импульсов с энерговыделением от 1 до 12 МэВ во временном интервале 50–550 мкс после мюонного триггера за 45 летних (июнь, июль, август) и 45 зимних (декабрь, январь, февраль) месяцев. Временные распределения аппроксимировались законом $N_n(t) = N_0 \exp(-t/\tau) + B$, где $\tau = 180$ мкс — показатель экспоненты захватных γ -квантов, B — константа, зависящая от фоновых условий счетчика, $N_0\tau$ — полное число нейтронов.

Было получено, что удельное число нейтронов в расчете на счетчик составляет летом $N_n/N_{tr}^s = 45566/10464715 = 4.35 \cdot 10^{-3}$, зимой $N_n/N_{tr}^w = 37703/10006669 = 3.77 \cdot 10^{-3}$. Амплитуда вариаций ($\delta N_n/N_n$) определялась как разница удельного числа нейтронов летом (s) и зимой (w), деленная на среднее значение: $\delta N_n/N_n = (N_n/N_{tr}^s - N_n/N_{tr}^w)/(N_n/N_{tr}^s + N_n/N_{tr}^w)$. Было получено значение $\delta N_n/N_n = 0.072 \pm 0.002$ (стат) ± 0.016 (сис).

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЕЗОННОЙ ВАРИАЦИИ СРЕДНЕЙ ЭНЕРГИИ МЮОНОВ НА ГЛУБИНЕ LVD

Число нейтронов, генерируемых мюонами, описывается законом $N_n \propto E_\mu^{0.78}$ [10], где E_μ — средняя энергия потока мюонов на глубине LVD.

Таким образом, увеличение числа нейтронов летом может быть выражено в виде

$$(N_n + \delta N_n)/N_n = [(E_\mu + \delta E)/E_\mu]^{0.78}. \quad (1)$$

Подставляя измеренное значение $\delta N_n/N_n = 0.076$ (среднее значение, определенное двумя методами), получаем $\delta E/E_\mu \approx 0.10$, т.е. средняя энергия мюонов летом увеличивается на 10%.

Следовательно, поток нейтронов, образуемых мюонами, испытывает сезонные вариации под действием двух факторов: а) изменения интенсивности мюонов, б) изменения их средней энергии; доминирующим является последний: $1 + \delta\Phi_n = (1 + \delta I_\mu)(1 + \delta N_n) = 1.015 \times 1.076$, т.е. $\delta\Phi_n(I_\mu, N_n) = 9.2\%$.

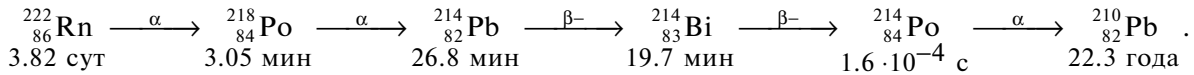
4. СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ ФОНА В ПОДЗЕМНОЙ ЛАБОРАТОРИИ LNGS

Источником фона в подземной лаборатории в области низких энергий (0.5–5 МэВ) является главным образом спонтанное деление ядер U, Th, входящих в состав скалы и материалов установки, и их дочерние элементы. Ими создается поток фоновых γ -квантов и, в меньшей степени, нейтронов.

Варьирующая компонента фона подземного помещения создается γ -квантами от распадов дочерних ядер радона ^{222}Rn . Ниже мы определим ам-

плитуду и фазу сезонных модуляций фона естественной радиоактивности по темпу счета установки LVD в области энергии 0.5–5 МэВ.

Средняя концентрация радона ^{222}Rn в зале А лаборатории Гран Сассо составляет $25 \pm 8 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$.



Гамма-излучение создается в основном ядрами $^{214}_{83}\text{Bi}$, за счет β -распада превращающимися в $^{214}_{84}\text{Po}$ с характерным временем $\tau = 19.7$ мин. Энергетический спектр γ -излучения охватывает диапазон от 0.6 до 2.44 МэВ. Инжекция радона в атмосферу помещения происходит как непосредственно из грунта, так и из воды, которая насыщается радоном на пути через скальную породу до подземного зала, где находится установка. Радон накапливается в грунте в результате деления и распадов элементов уран-радиевого ряда и выходит в атмосферу и в водонесущие русла через множественные микротрещины в скале.

Большая регистрирующая поверхность счетчиков детектора LVD делает измерения независимыми от локальных вариаций концентрации радона в разных местах помещения. Постоянство температуры подземной камеры позволяет исключить влияние значительных суточных температурных вариаций на концентрацию радона. При увеличении

Средний темп счета установки LVD по низкому порогу равен 45 ± 10 Гц.

Установка LVD регистрирует γ -кванты от распадов дочерних ядер радона ^{222}Rn , период полураспада которого 3.8 сут. Наиболее вероятна следующая цепочка радиоактивных распадов:

концентрации действие вентиляции в камере всякий раз приводит темп счета детектора к обычному уровню (в момент выбросов радона темп счета повышается примерно в 1.5–2 раза) [11]. Для выделения сезонных вариаций использовался месячный темп счета внутренних счетчиков трех башен LVD (около 220 счетчиков).

Были проанализированы данные при энергетическом пороге 0.5 МэВ с 2001 по 2016 год. Темп счета детектора, нормированный на средней темп счета, представлен на рис. 2. Для определения характеристик вариации использовался метод наложения эпох по данным с 2008 по 2016 год, так как с 2003 по 2007 в подземном помещении работала вентиляция по измененной схеме [12]. Фитируя временное распределение законом $N_b(t) = 1 + (\delta N_b/N_b) \cos(2\pi(t - \varphi)/T)$ с бином 1 мес. и принимая период $T = 12$ месяцев, мы получили амплитуду сезонной модуляции фона $\delta N_b/N_b = 4 \pm 2\%$ и фазу $\varphi = 8.1 \pm 0.4$ (начало августа).

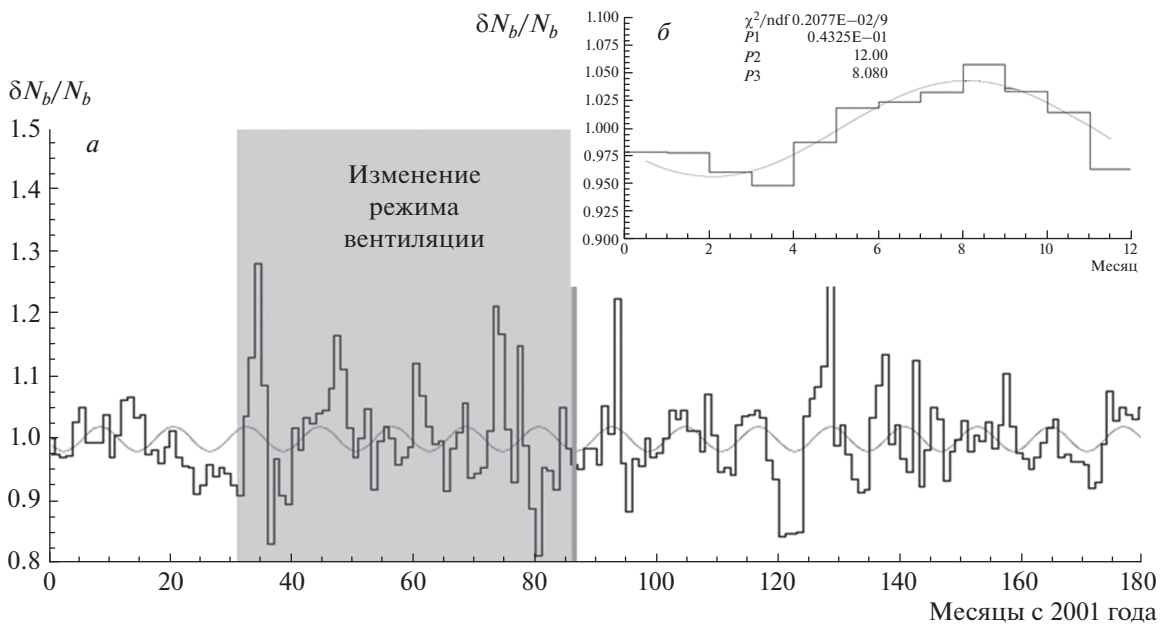


Рис. 2. а – Средний темп счета установки LVD для порога 0.5 МэВ по месяцам, нормированный на среднее по каждому году; б – вариации темпа счета в течение года, полученные методом наложения эпох: $\delta N_b/N_b = 0.04 \pm 0.02$, $\varphi = 8.1 \pm 0.4$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено наличие сезонных вариаций мюон-индуцированных нейтронов в расчете на мюон. Определены характеристики вариаций разностным методом (лето—зима) $\delta N_n/N_n = 0.072 \pm \pm 0.002$ (stat) ± 0.016 (sys) и методом наложения эпох: $f(t) = 1 + (\delta N_n/N_n)\cos(2\pi(t - \varphi)/T)$, $\delta N_n/N_n = 0.08 \pm 0.02$, $\varphi = 7.0 \pm 0.4$ (стат.) ± 0.5 (сис.) мес.

Измеренные характеристики вариаций нейтронов указывают на сезонные вариации средней энергии мюонов 280 ГэВ на глубине LVD с амплитудой 10%: $\bar{E}_\mu = 280 \pm 28$ ГэВ.

Ранее предполагалось, что поток космогенных нейтронов пропорционален интенсивности мюонов с амплитудой вариации 1.5%. Нами показано, что поток нейтронов имеет амплитуду сезонных вариаций в 6 раз большую, так как энергия мюонов также варьируется с амплитудой $\sim 10\%$.

Сезонные вариации фона естественной радиоактивности подземного помещения обусловлены сезонными колебаниями концентрации радона, связанными с изменением температуры грунтовых вод, а также температуры и влажности атмосферы подземной камеры. Амплитуда измеренных вариации составляет $\delta N_b/N_b = 0.04 \pm 0.02$, фаза $\varphi = 8.1 \pm 0.4$ мес.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Blacket P.M.* // Phys. Rev. 1938. V. 54. P. 973; *Barrett P.H., Bollinger L.M., Cocconi G., Eisenberg Y., Greisen K.* // Rev. Modern Phys. 1952. V. 24. № 3. P. 133.
2. *Ambrosio M. et al. MACRO Collaboration* // Astropart. Phys. 1977. V. 7. P. 109.
3. *Grashorn E.W. for MINOS collaboration* // Proc. 30th ICRC. 2007. Merida arXiv:0710.1616.
4. *Bouchta A. for AMANDA Collaboration* // Proc. 26th ICRC. Salt Lake City. 1999. V. 2. P. 108.
5. *Selvi M. for LVD Coll.* // Proc. 31st ICRC. Lodz. (Poland). 2009.
6. *Serap Tilav for IceCube Collaboration* // arXiv: 1001.0776.
7. *Davide D'Angelo for Borexino Collaboration* // arXiv: 1109.3901.
8. *Bari G. et al.* // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A. 1988. V. 264. P. 5.
9. *Agafonova N.Y. et al. (LVD Collaboration)* // Astrophys. J. 2015. V. 802. P. 47.
10. *Агафонова Н.Ю., Мальгин А.С.* // ЯФ. 2013. Т. 76. № 5. С. 650.
11. *Агафонова Н.Ю., Алексеев В.А., Добрынина Е.А. и др.* // Препринт ИЯИ РАН. Декабрь 2001.
12. *Bruno G.* // J. Phys. Conf. Ser. 2010. V. 203. 012091.