

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ И ПОЛЯ

ИЗМЕРЕНИЕ СЕЗОННЫХ ВАРИАЦИЙ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ МЮОНОВ НА ПОДЗЕМНОМ ДЕТЕКТОРЕ LVD

© 2020 г. Н. Ю. Агафонова^{1)*}, В. В. Ашихмин¹⁾, Е. А. Добрынина¹⁾,
А. С. Мальгин¹⁾, О. Г. Рязская¹⁾, И. Р. Шакирьянова¹⁾
(от имени Коллаборации LVD)

Поступила в редакцию 14.08.2019 г.; после доработки 14.08.2019 г.; принята к публикации 14.08.2019 г.

Сцинтилляционный детектор LVD, расположенный в Лаборатории Гран-Сассо на средней глубине 3650 м в.э., измеряет мюоны с интенсивностью $3.31 \times 10^{-4} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. В настоящей работе представлены результаты анализа характеристик сезонных вариаций потока мюонов в горизонтальном и вертикальном направлениях. Большая часть регистрируемых горизонтальных мюонов в детекторе соответствует глубинам грунта около 5 км в.э. и зенитным углам θ около 75° . Вертикальным мюонам ($\theta \approx 13^\circ$) соответствуют глубины около 4.6 км в.э.

DOI: 10.31857/S004400272001002X

ВВЕДЕНИЕ

В экспериментах DAMA/LIBRA [1], XENON100 [2], XMASS [3] по прямому детектированию холодной темной материи — гипотетических частиц WIMP'ов — существует нетривиальный канал образования фона, в котором нейтроны, образованные мюонами, имитируют не только сигнатуру взаимодействия, но и воспроизводят ожидаемые сезонные вариации сигналов, вызываемых WIMP'ами. Предполагается, что они имеют массу в интервале от $\text{ГэВ}/c^2$ до $\text{ТэВ}/c^2$ и, будучи гравитационно-связанными с барионным веществом Галактики, обладают скоростями движения в несколько сотен км/с ($\sim 200 \text{ км/с}$). При упругом рассеянии на ядрах вещества детектора WIMP'ы могут образовать ядра отдачи с энергиями 1–100 кэВ. Ожидаемый темп регистрации ядер отдачи в 1 кг вещества мишени не превышает 1 соб./год. Темп регистрации WIMP'ов должен испытывать модуляции вследствие сезонных вариаций скорости движения Земли относительно центра Галактики и галактического WIMP-“газа”. За счет вращения Земли вокруг Солнца и движения Солнечной системы в Галактике темп регистрации летом (вектор движения Земли направлен, приблизительно, по движению Солнечной системы) превышает зимний темп (векторы противоположно направлены).

Нейтроны, рожденные атмосферными мюонами под землей, как и WIMP'ы, способны в упругих nA -столкновениях образовывать ядра отдачи с

энергией в кэВ'ном диапазоне. Темп счета этих событий тоже должен иметь сезонные вариации, поскольку поток нейтронов на глубинах больше $\sim 2.5 \text{ км в.э.}$ варьируется с амплитудой около 10% и максимальной величиной в начале июля. Вариации связаны с положительным температурным эффектом, увеличивающим интенсивность и среднюю энергию мюонов в летние месяцы и уменьшающим эти характеристики зимой в результате тепловых вариаций плотности земной атмосферы [4–7].

ОПИСАНИЕ ДЕТЕКТОРА LVD

Основной задачей эксперимента LVD является долговременный поиск нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звездных ядер [8]. В силу своих конструктивных особенностей детектор также располагает широкими возможностями для изучения мюонов космических лучей под землей.

Детектор расположен на средней по потоку мюонов глубине $3720 \pm 190 \text{ м в.э.}$ Средняя энергия потока мюонов составляет 280 ГэВ, вертикальная интенсивность мюонов $I_\mu = (3.31 \pm 0.03) \times 10^{-4} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Основным элементом детектирующей системы является сцинтилляционный счетчик с размерами $1.0 \times 1.0 \times 1.5 \text{ м}^3$, заполненный жидким сцинтиллятором C_nH_{2n} , $n \approx 10$.

LVD состоит из трех башен, каждая из которых содержит пять вертикальных колонн. Колонна, состоящая из вертикально размещенных семи портанков — металлических кассет, в каждую из которых помещены восемь сцинтилляционных счетчиков. Полностью установка LVD содержит 840 сцинтилляционных счетчиков. Счетчики детектора

¹⁾Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва.

*E-mail: Agafonova@inr.ru

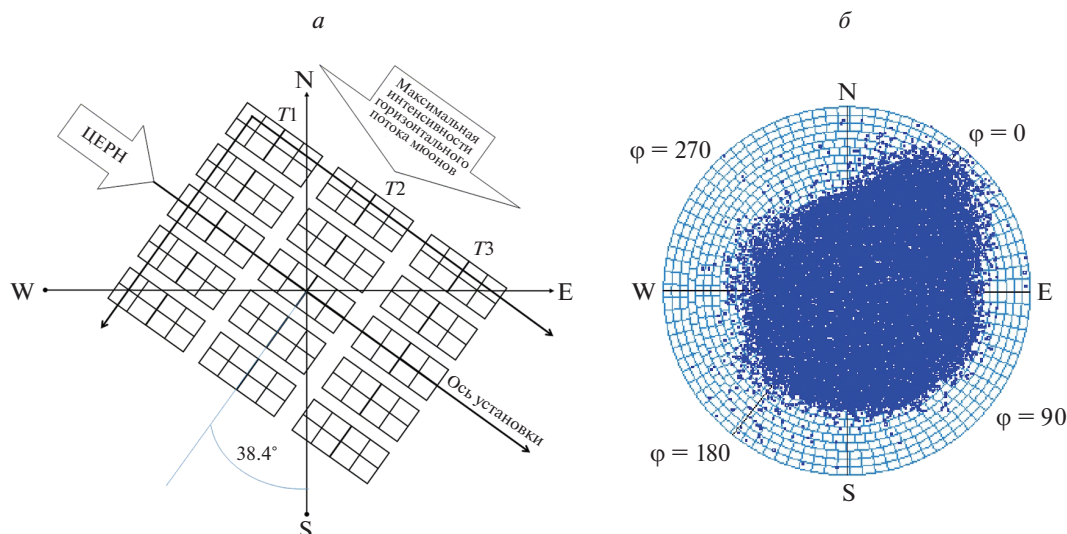


Рис. 1. Схема расположения установки LVD относительно сторон света (а), угловое распределение мюонов в полярных координатах (б).

имеют номера — аббревиатуру “TCLP”, где T — башня (1–3), C — колонна (1–5), L — уровень (1–7), P — счетчик (1–8).

Первая башня LVD начала работать в 1992 г., три башни — в 2002 г. Полная масса жидкого сцинтиллятора равна 970 т. Масса железа, образующего несущую структуру установки, — около 1000 т.

В состав LVD до конца 2002 г. входила трековая система, с помощью которой определялись направление траектории мюонов, кратность мюонных групп. Трековая система состояла из вертикальных и горизонтальных плоскостей газоразрядных трубок, работающих в ограниченном стримерном режиме. Точность определения координат трека заряженной частицы составляла ± 3 см.

МЕТОД ОТБОРА МЮОНОВ

Мюонным считается LVD-событие, в котором имеются два счетчика, зарегистрировавших в течение 250 нс энерговыделения больше 20 МэВ. За сутки работы установки отбирается, в среднем, около 6000 мюонных событий. Из полного количества событий, регистрируемых в LVD, около 6% составляют группы мюонов.

Продольная ось установки LVD ориентирована на ЦЕРН и составляет 38.4° с направлением юг-север (рис. 1а). Угловое распределение мюонов (рис. 1б) в полярных координатах отражает форму поверхности горного массива над установкой. Угол φ отсчитывается от фронтальной стороны первой башни к боковой по часовой стрелке. Для полного потока мюонов угол максимальной интенсивности $\theta = 28^\circ$.

Вид углового распределения показывает область с большими зенитными углами θ : $65\text{--}90^\circ$

и азимутальными (φ) в направлении на северо-восток. Это околоразностные мюоны в направлении на северо-запад, которые пересекают детектор вдоль короткой стороны (рис. 1а).

Основной сложностью анализа данных является расчет геометрического фактора установки — акцептанса, который должен учитывать изменения конфигурации детектора (расположение в детекторе работающих сцинтилляционных счетчиков) для потоков мюонов разного направления.

Модульная структура детектора позволяет выделять мюоны вертикального и горизонтального направлений, используя расположение счетчиков.

При установлении характеристик потока горизонтальных и вертикальных мюонов мы использовали мюонный годоскоп из двух счетчиков или метод “равного акцептанса”, который заключается в отборе мюонов парами счетчиков (рис. 2).

Для горизонтального мюонного годоскопа пару составляли счетчики одного уровня башни соседних колонн с одинаковым номером в портатанке (например, TCLP = 1117 и TCLP = 1217), рис. 2а. Расстояние между центрами счетчиков годоскопа 2.75 м.

Для вертикального мюонного годоскопа отбирались пары счетчиков, стоящих один над другим через уровень (например, TCLP = 1128 и TCLP = 1148), рис. 2б. Расстояние между центрами счетчиков вертикального годоскопа 3.01 м.

Максимальное число пар счетчиков в трех башнях детектора могло быть 672 и 600 для горизонтального и вертикального потоков мюонов соответственно.

В первую очередь мы устанавливали стабильно работающие счетчики по темпу счета каждого счетчика в течение месяца и связывали счетчики

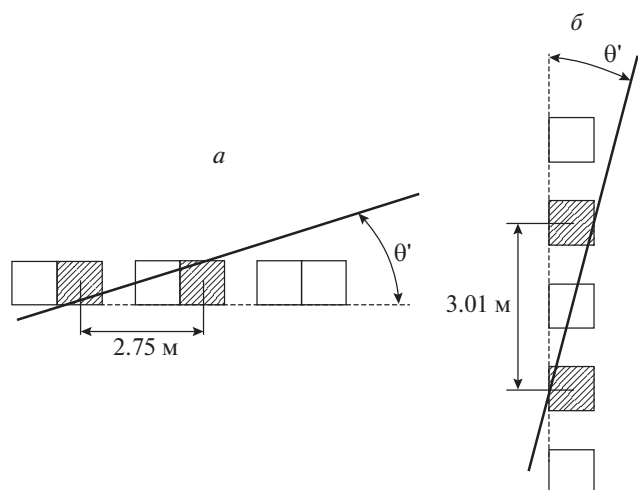


Рис. 2. Схема годоскопов из двух счетчиков для горизонтального (а) и вертикального (б) направлений.

в пары. Распределение темпов счета счетчиков представлено на рис. 3. Средний темп счета мюонов третьей башни больше, чем второй и первой. Это объясняется расположением третьей башни в объеме экспериментального зала.

Мы фиксировали отобранные пары счетчиков в каждом месяце. При этом “хорошими” считались счетчики, вариации темпа счета которых не превышали 10%.

Энерговыделение мюона в счетчике пары должно было превышать 50 МэВ. Среднее энерговыделение мюона в одном счетчике составляет около 175 МэВ, которое соответствует длине ~ 1 м прохождения мюона. Число отобранных мюонных событий за месяц приводилось в расчете на пару в сутки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Описанный выше метод элементарных независимых годоскопов был проверен на реконструированных мюонных событиях вертикального и горизонтального направлений в период, когда работала трековая система с 1999 по 2002 гг. Получено, что метод выделяет околоразнонаправленные мюоны с углами θ от 69° до 90° . С привлечением карты горы Гран-Сассо была определена также средняя глубина грунта над установкой для горизонтальных мюонов $\bar{H}^h = 4.98 \pm 0.25$ км в.э. Число таких мюонов в полном количестве мюонных событий составляет около $N_h/N_{\text{tot}} = 2.6\%$, темп счета — 0.66 мюона/сут на пару. Для выделенных околоразнонаправленных мюонов с зенитными углами θ от 0° до 22° средняя глубина грунта $\bar{H}^v = 3.57 \pm 0.18$ км в.э. ($N_v/N_{\text{tot}} = 21.7\%$), их темп счета — 3.28 мюона/сут на пару.

Метод равного аксептанса позволяет избежать расчета аксептанса детектора в целом, а использовать постоянный аксептанс элементарного годоскопа.

Вариации горизонтальных мюонов

Сезонные вариации темпа счета околоразнонаправленных мюонов по данным с 2002 по 2018 гг. представлены на рис. 4 в виде гистограммы. Аппроксимация этого распределения гармонической функцией $f(t) = I_\mu^h + \delta I_\mu^h \times \cos(2\pi(t - \varphi)/365)$ дала значение вариации δI_μ^h около $1.7 \pm 0.3\%$. В каждом бине гистограммы около 10000 событий.

Средний темп счета выделенных горизонтальных мюонов составляет 0.665 соб./сут в расчете на один годоскоп.

Метод наложения эпох (рис. 5) дает такую же величину амплитуды модуляции. Здесь темп счета приведен на среднее значение в год. Максимум интенсивности приходится на $\varphi^h = 182 \pm 5$ сут от начала года.

Вариации вертикальных мюонов

Методом “независимых годоскопов”, когда выбирались счетчики один над другим через один уровень, были также получены вариации темпа счета околоразнонаправленных мюонов (гистограммы на рис. 6 и 7). Аппроксимация обеих гистограмм гармонической функцией дает амплитуду вариации темпа счета $\delta I_\mu^v = 1.0 \pm 0.2\%$ и фазу на $\varphi^v = 187 \pm 5$ сут от начала года. Величина $\delta I_\mu^v = 1.0\%$ меньше амплитуды $\delta I_\mu^{\text{tot}} = 1.5\%$ для всех мюонов, регистрируемых установкой LVD [9]. Сезонные вариации полного потока мюонов были измерены в период набора данных с 2001 по 2008 гг.

Это связано с очевидным фактом — меньшей средней энергией мюонов вертикального направления по сравнению со средней энергией всех мюонов. Средний темп счета выделенных вертикальных мюонов составляет 3.28 соб./сут в расчете на один годоскоп.

Обсуждение

Сезонные вариации интенсивности мюонов связаны с изменением температуры в верхних слоях атмосферы: $\Delta I_\mu/I_\mu = \alpha_T \Delta T/T$, где α_T — температурный коэффициент. В работе [10] для мюонов всех направлений, зарегистрированных в LVD, был получен температурный коэффициент $\alpha_T = 0.93 \pm 0.02$. Величина вариации интенсивности мюонов составила $\delta I_\mu = 1.5\%$.

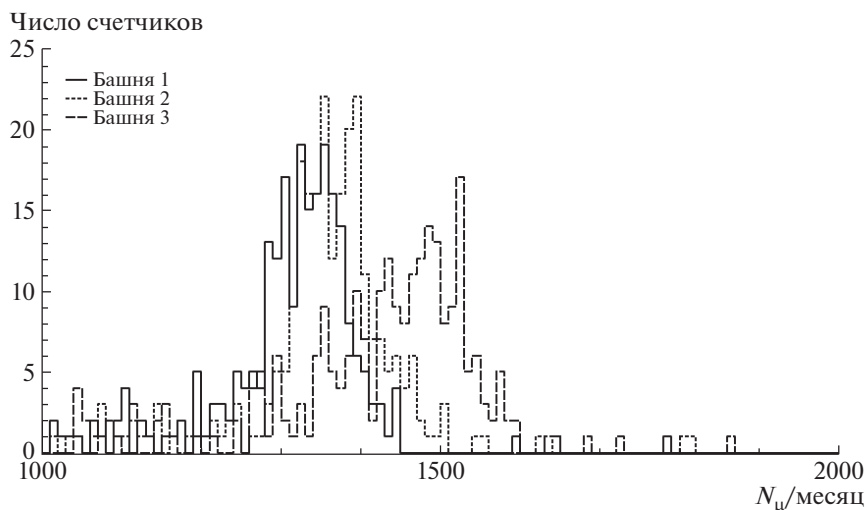


Рис. 3. Распределение темпов счета счетчиков для мюонных импульсов с энергией $E > 50$ МэВ.

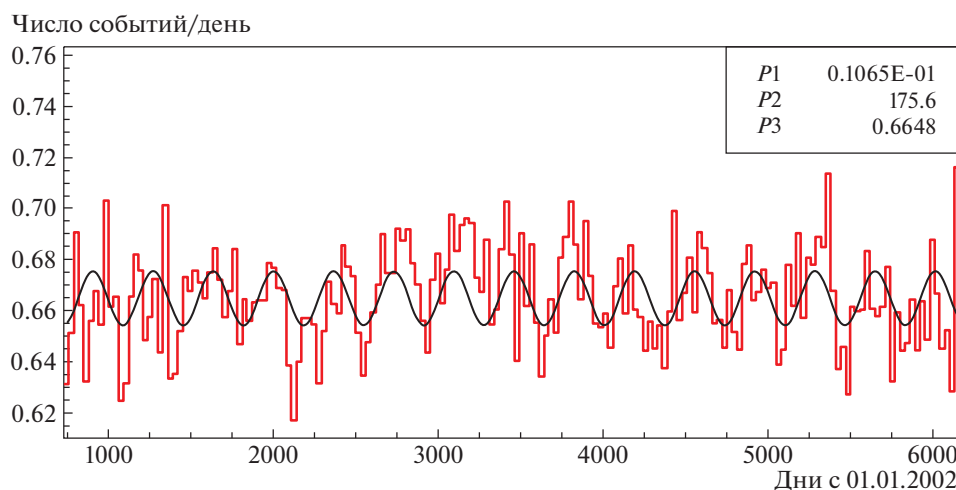


Рис. 4. Вариации темпа счета горизонтальных мюонов с 01.01.2004 по 31.12.2018. Бин — 30 сут. Кривая — аппроксимация $f(t) = P3 + P1 \cos(2\pi(t - P2)/365)$.

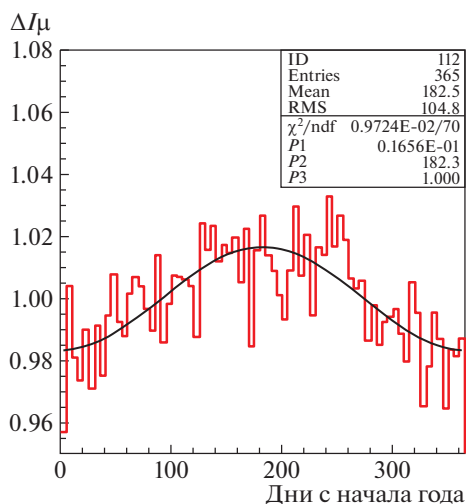


Рис. 5. Вариации темпа счета горизонтальных мюонов, метод наложения эпох. Бин — 5 сут. Кривая — аппроксимация $f(t) = 1 + P1 \cos(2\pi(t - P2)/365)$.

Положительный температурный эффект связан с сезонными вариациями числа распадов, в основном, пионов первого поколения генерации, нарастающего при расширении атмосферы и падении плотности ее верхних слоев (на высоте ~ 30 км) летом и наоборот — зимой.

Аппроксимация сезонных изменений интенсивности мюонов гармонической функции вносит систематическую погрешность в определение величины δI_μ . Это связано с негармоническим видом распределений, что ясно видно на рис. 7. Распределение имеет длинный подъем к максимуму (примерно 230-й день от начала года) и более короткий спад до минимума. Этот эффект был обнаружен при сравнении вариаций мюонов на LVD и температурных данных над установкой в [11], сезонные вариации которых также отличаются от синусоидального закона.

Такое поведение объясняется эффектом внезапных стратосферных потеплений (ВСП) [12, 13].

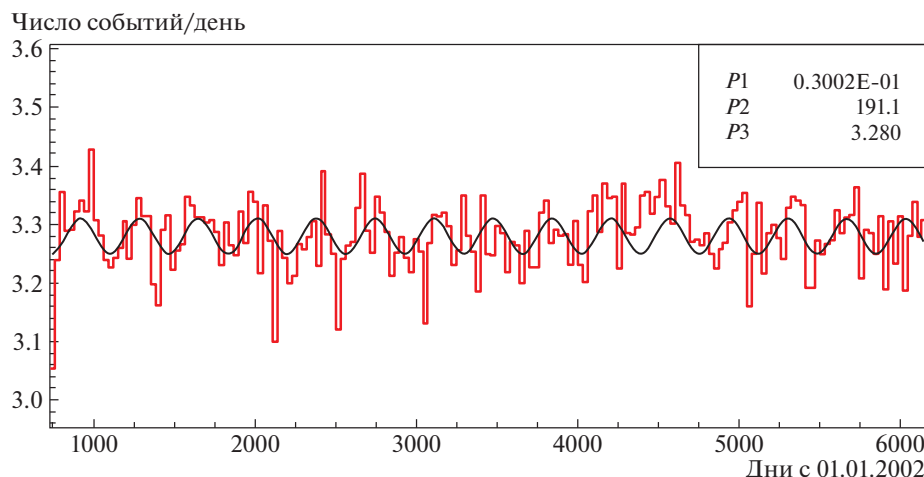


Рис. 6. Вариации темпа счета вертикальных мюонов с 01.01.2004 по 31.12.2018. Бин — 30 сут. Кривая — аппроксимация $f(t) = P3 + P1 \cos(2\pi(t-P2)/365)$.

Происходящие в течение зимнего — начале весеннего сезона ВСП характеризуются быстрым и значительным увеличением (за несколько суток на десятки градусов) температуры стратосферы и даже тропосферы, в диапазоне высот 10–50 км. Изменения динамики стратосферы приводят к систематически значительным аномалиям погоды в январе–феврале [14, 15], повышению температуры в конце зимы и тем самым отличию от гармонического вида сезонного поведения температуры.

Околовертикальные мюоны образуются в распадах пионов, пробег которых в разреженной атмосфере на порядок меньше, чем для околоразорных. Поэтому можно допустить, что влияние ВСП на вариации вертикальных мюонов сильнее, чем на вариации мюонов всех направлений и околоразорных мюонов.

Влияние на величину δI_μ априорного допущения о гармоническом виде сезонных вариаций мюонов

можно исключить, применяя разностный метод, в котором используются суммарные величины числа мюонов за три летних и три зимних месяца.

Так были определены величины вариации $\delta I_\mu^{\text{hor}} = 1.8 \pm 0.2\text{stat} \pm 0.2\text{sys}\%$ и $\delta I_\mu^{\text{ver}} = 1.1 \pm 0.06\text{stat} \pm 0.2\text{sys}\%$ для околоразорных и околовертикальных мюонов соответственно. Видим, что разностный метод дает большие значения амплитуды вариаций для околовертикальных мюонов по сравнению с методом, использующим аппроксимацию данных гармонической функцией.

В табл. 1 приведены основные характеристики вертикального и горизонтального потоков мюонов, а также дано сравнение их с данными по полному потоку мюонов. Значения характеристик полного потока мюонов взяты из работ [10, 16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Характеристики сезонных вариаций потоков мюонов разных направлений получены по данным установки LVD в период с 2004 по 2018 гг. Методом независимых элементарных годоскопов выделены 1.9×10^6 околоразорных и 8×10^6 околовертикальных мюонов и установлены амплитуда и фаза их сезонных вариаций.

Проведенные исследования относятся к мюонам высокой энергии: пороговая энергия (50% вероятности выживания) мюонов на уровне моря для вертикальных мюонов $E_\mu^{\text{th}} \approx 1.8$ ТэВ, для горизонтальных $E_\mu^{\text{th}} \approx 4.7$ ТэВ. В дальнейшем планируется определить временные характеристики нейтронов, образуемых этими мюонами.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ № 18-02-00064_а и программы фундаментальных исследований Президиума РАН “Физика фундаментальных взаимодействий и ядерные технологии”.

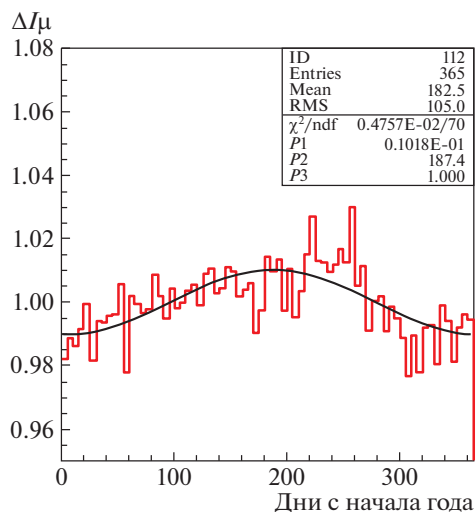


Рис. 7. Вариации темпа счета вертикальных мюонов, метод наложения эпох. Бин — 5 сут. Кривая — аппроксимация $f(t) = 1 + P1 \cos(2\pi(t-P2)/365)$.

Таблица 1. Сравнение характеристик мюонов разного направления

	Все мюоны	Околовертикальные мюоны	Окологоризонтальные мюоны
Глубина грунта $\langle H \rangle$, м в.э.	3720 ± 190	3570 ± 180	4980 ± 250
Интервал зенитного угла, средний угол $\langle \theta \rangle$	0–90 36 ± 1	0–22 13 ± 1	69–90 75 ± 1
Средняя энергия мюонов $\langle E \rangle$, ГэВ (расчетная величина получена с использованием аналитического выражения [16])	280 ± 18	260 ± 30	340 ± 40
Площадь регистрации S , м ² (расчетная величина получена из МК-моделирования)	298 ± 3	0.53 ± 0.01	0.56 ± 0.01
Фаза, $I_{\mu}^{\max}$, сут (метод аппроксимации гармонической функцией)	187 ± 3	182 ± 5	178 ± 5
Амплитуда вариации δI_{μ} (метод аппроксимации гармонической функцией), %	1.5 ± 0.1	1.0 ± 0.2	1.7 ± 0.3
Амплитуда вариации δI_{μ} (разностный метод), %	—	$1.1 \pm 0.06 \text{ stat} \pm 0.2 \text{ sys}$	$1.8 \pm 0.2 \text{ stat} \pm 0.2 \text{ sys}$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. Bernabei, P. Belli, A. Di Marco, F. Montecchia, A. d'Angelo, A. Incicchitti, F. Cappella, V. Caracciolo, R. Cerulli, C. J. Dai, H. L. He, H. H. Kuang, X. H. Ma, X. D. Sheng, R. G. Wang, and Z. P. Ye, in *Proceedings to the 19th Workshop "What Comes Beyond the Standard Models", Bled, July 11–19, 2016*, doi:10.1051/epjconf/201713605001, arXiv: 1612.01387 [hep-ex].
2. E. Aprile *et al.* (XENON Collab.), *Phys. Rev. D* **96**, 022008 (2017), <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.96.022008>, arXiv: 1705.05830 [hep-ex].
3. K. Abe *et al.* (XMASS Collab.), *Phys. Rev. Lett.* **113**, 121301 (2014), <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.113.121301>, arXiv: 1406.0502 [astro-ph.CO].
4. P. M. S. Blackett, *Phys. Rev.* **54**, 973 (1938).
5. Е. Л. Фейнберг, Докл. АН СССР **LIII** (5), 421 (1946).
6. M. Forró, *Phys. Rev.* **72**, 868 (1947).
7. Л. И. Дорман, Е. Л. Фейнберг, УФН **59**, 189 (1956).
8. N. Y. Agafonova *et al.* (LVD Collab.), *ApJ* **802**, 47 (2015).
9. M. Selvi (for the LVD Collab.), in *Proceedings of the 31st ICRC (2009)*.
10. C. F. Vigorito *et al.* (on behalf of the LVD Collab.), PoS(ICRC2017) 291 (2018).
11. Н. Агафонова, Измерение вариаций потока атмосферных мюонов с помощью подземного детектора LVD, 1161-й семинар "Нейтринная и ядерная астрофизика" им. Г.Т. Зацепина, 2 ноября 2018.
12. S. S. Gaigerov, V. N. Glazkov, E. D. Zhorova, M. Ya. Kalikhman, V. S. Kurakin, D. A. Tarasenko, V. V. Fedorov, M. K. Federova, and L. V. Sherbakova, *J. Atm. Terr. Phys.* **48**, 1111 (1986).
13. П. Н. Варгин, В. А. Юшков, С. М. Хайкин, Н. Д. Цветкова, С. В. Кострыкин, Е. М. Володин, Вестн. РАН **80**, 114 (2010).
14. J. McGuirk and D. Douglas, *Mon. Weather Rev.* **116**, 162 (1988).
15. D. W. J. Thompson, S. Lee, and M. P. Baldwin, *Geophys. Monograph Ser.* **134**, 81 (2003).
16. А. С. Мальгин, Дис. ... д-ра физ.-мат. наук, ИЯИ РАН (Москва, 2018).

MEASURING SEASONAL VARIATIONS OF HORIZONTAL MUONS ON THE UNDERGROUND LVD SETUP

N. Yu. Agafonova¹⁾, V. V. Ashikhmin¹⁾, E. A. Dobrynina¹⁾, A. S. Malgin,
O. G. Ryazhskaya¹⁾, I. R. Shakiryanova¹⁾
(on behalf of the LVD Collaboration)

¹⁾ Institute for Nuclear Research RAS, Moscow, Russia

The LVD scintillation detector, located at the Gran Sasso Laboratory at an average depth of 3650 m w.e., measures muons with an intensity of $3.31 \times 10^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Seasonal variations of the total muon flux, measured over 8 years of operation, were obtained in [1] and are equal to 1.5%. This paper presents the results of an analysis of the seasonal variations' characteristics of a near horizontal and vertical muon flux. Most of the detected near-horizontal muons in the detector correspond to the depth of about 5 km w.e. and zenith angles of about 75°. Vertical muons ($\theta \approx 13^\circ$) correspond to the depths of about 4.6 km w.e.