

УДК 524.1

ВАРИАЦИИ МЮОНОВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В 2007–2019 гг.

© 2021 г. В. В. Шутенко¹, *, Н. С. Барбашина¹, А. Н. Дмитриева¹, Е. И. Яковлева¹

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

*E-mail: VVShutenko@mephi.ru

Поступила в редакцию 25.03.2021 г.

После доработки 22.04.2021 г.

Принята к публикации 28.05.2021 г.

Представлен анализ суточных вариаций мюонов космических лучей, измеренных с помощью мюонного годоскопа УРАГАН с 2007 по 2019 гг. Приведены характеристики среднегодовых суточных отклонений скорости счета в различных диапазонах зенитных углов. Приведено сопоставление с суточными вариациями скорости счета нейтронов по данным десяти нейтронных мониторов.

DOI: 10.31857/S0367676521090283

ВВЕДЕНИЕ

Еще в 20 в. было обнаружено, что фаза суточных вариаций космических лучей (КЛ) существенно изменяется в период минимума солнечной активности при положительной полярности Солнца [1, 2]. Первая теоретическая работа по объяснению зарегистрированных явлений была представлена в 1976 г. [3]. Статистика по динамике суточной анизотропии (анизотропия понимается в этой работе как суточное изменение скорости счета наземного детектора) космических лучей за период с 1936 по 1988 гг. по данным ионизационных камер и нейтронных мониторов была проанализирована в статье [4]. Вариации потока мюонов на поверхности Земли и сравнение с вариациями по нейтронным мониторам с 1958 по 1991 гг. были рассмотрены в статье [5]. Аномальному изменению фазы суточных вариаций космических лучей по данным нейтронных мониторов в период солнечного минимума 1954 года было уделено большое внимание в работе [6]. В [7] для анализа суточных вариаций использовались данные нейтронного монитора Deep River в период с 1981 по 1994 годы.

С самого начала исследований КЛ и по настоящее время их вариации находятся под пристальным вниманием. Большое количество уже известных и еще неизвестных факторов влияют на поток мюонов на поверхности Земли, и поэтому исследование вариаций потока мюонов до сих пор остаются актуальными. Мюонный годоскоп (МГ) УРАГАН [8] обеспечивает одновременную регистрацию потока заряженных частиц в широком угловом диапазоне и позволяет взглянуть на

вариации потока мюонов с новой, ранее не доступной, точки зрения.

ДАННЫЕ МГ УРАГАН 2007–2019 гг.

Мюонный годоскоп УРАГАН (55.65° с.ш., 37.67° в.д., высота — 173 м н. у. м.) работает с февраля 2007 г. Исходные данные представляют собой: дату и время начала и конца интервала регистрации в UTC по ГЛОНАСС, среднее атмосферное давление, живое время и двумерные гистограммы количества реконструированных треков мюонов в ячейках размером 1° по зенитному углу (от 0° до 80°) и 4° по азимутальному углу (от 0° до 360°). Это позволяет анализировать скорость счета мюонов в различных диапазонах зенитных углов. Статистическая погрешность среднечасовой скорости счета в диапазоне зенитных углов 0°–80° составляет около 0.03%. При обработке данных МГ УРАГАН использовалась методика, изложенная в [9]. Наряду с барометрической коррекцией использовалась и температурная коррекция (учет температурного профиля атмосферы) [10].

Анализируются среднечасовые скорости счета в следующих диапазонах зенитных углов: 0°–17°, 17°–26°, 26°–34°, 34°–44°, 44°–70°. Стоит отметить, что этим диапазонам соответствует поток первичных протонов с медианной энергией: 39, 41, 44, 50 и 65 ГэВ, соответственно. Асимптотическая долгота для вертикального направления в МГ УРАГАН составляет 70° для протонов медианных энергий (38 ГэВ) и 62° для протонов средних энергий (63 ГэВ).

Таблица 1. Перечень нейтронных мониторов, используемых для анализа суточных вариаций. Географическое положение, пороговая жесткость R_c (<http://www01.nmdb.eu/nest/help.php#helpstations>) и асимптотическая долгота

Станция	Широта, °	Долгота, °	Высота, м н. у. м.	R_c , ГВ	Асимптотическая долгота (λ_{asymp}), ° (для 10 ГэВ)
APTY	67.57	33.39	181	0.65	64.9
ATHN	37.97	23.76	260	8.53	78.2 (для 25 ГэВ)
FSMT	60.02	-111.93	180	0.30	-94.9
KERG	-49.35	70.25	33	1.14	80.4
MOSC	55.47	37.32	200	2.43	79.5
OULU	65.05	25.47	15	0.81	58.9
THUL	76.5	-68.7	26	0.30	-31.7
NAIN	56.55	-61.68	46	0.30	-21.7
INVK	68.36	-133.72	21	0.30	-124.4
IRKT	52.47	104.03	435	3.64	153.1 (для 15 ГэВ)

ДААННЫЕ НЕЙТРОННЫХ МОНИТОРОВ 2007–2019 гг.

Для сравнения с МГ УРАГАН было выбрано десять нейтронных мониторов (см. табл. 1). На выбор детекторов влияли стабильность работы, доступность данных (среднечасовая скорость счета с 2007 по 2019 гг.) и пороговая жесткость. К сожалению, в южном полушарии нашелся только один детектор KERG с доступными данными с 2008 по 2019 гг. Данные нейтронного монитора MOSC брались с <http://cr0.izmiran.ru/mosc>, IRKT – <http://cgm.iszf.irk.ru/irkt/main.htm>. Данные других детекторов были взяты с <http://www01.nmdb.eu/nest>.

Асимптотические направления протонов в 2019 г. почти не изменились по сравнению с 2009 г. То есть, изменение магнитного поля Земли с 2009 по 2019 гг. существенно не повлияло на траектории протонов рассматриваемых энергий. Но уменьшение магнитного поля Земли с 2009 по 2019 гг. привело к некоторому уменьшению пороговых жесткостей.

КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ОЦЕНКИ СУТОЧНЫХ ВАРИАЦИЙ

Для количественных оценок изменения во времени среднегодовых суточных отклонений скорости счета использовались: размах суточных отклонений и фаза 24-часовой гармоник. Размах вычислялся как разница между максимальным и минимальным значением суточных отклонений. Фаза 24-часовой гармоник (φ_{24}) определялась с помощью аппроксимации суточных отклонений формулой, аналогичной формуле в работе [6], которая включает в себя 24-, 12- и 8-часовые гармоники.

На рис. 1 представлены значения размахов и фазы 24-часовой гармоник среднегодовых суточных отклонений скорости счета по данным МГ УРАГАН в пяти диапазонах зенитных углов (рис. 1а и 1б) и по данным десяти нейтронных мониторов (рис. 1б и 1г).

Как видно на рис. 1а и 1б, значения размахов суточных отклонений в различных диапазонах зенитных углов МГ УРАГАН и у большинства нейтронных мониторов после 2014 года стали уменьшаться и в 2019 г. почти сблизилась. Исключением является динамика изменений размахов у нейтронных мониторов KERG и THUL.

На рис. 1в видно, что фаза 24-часовой гармоник почти не зависит от диапазона зенитных углов МГ УРАГАН. На рис. 1г представлены количественные оценки фазы 24-часовой гармоник в свободном пространстве по нейтронным мониторам. Значение фазы в часах LST (Local Solar Time) вычислялось так: $\varphi_{24LST} = \varphi_{24UT} + 24\lambda_{asymp}/360^\circ$, где: φ_{24UT} – фаза в UT; λ_{asymp} (в градусах) – асимптотическая долгота для протонов (см. табл. 1). На рис. 1г видно, что для большинства нейтронных мониторов фазы 24-часовой гармоник близки по значению (± 1 ч) и со временем меняются одинаковым образом. Исключением являются нейтронные мониторы ATHN и NAIN.

Временной ряд фазы 24-часовой гармоник в часах LST, представленный ранее в работе [6], был дополнен по данным нейтронных мониторов MOSC и IRKT за 1984–2019 гг., и по данным МГ УРАГАН в диапазоне 0° – 17° (с учетом асимптотической долготы для протонов 38 ГэВ) за 2007–2019 гг. Объединенный временной ряд представлен на рис. 2. Здесь видно, что наблюдается хорошее

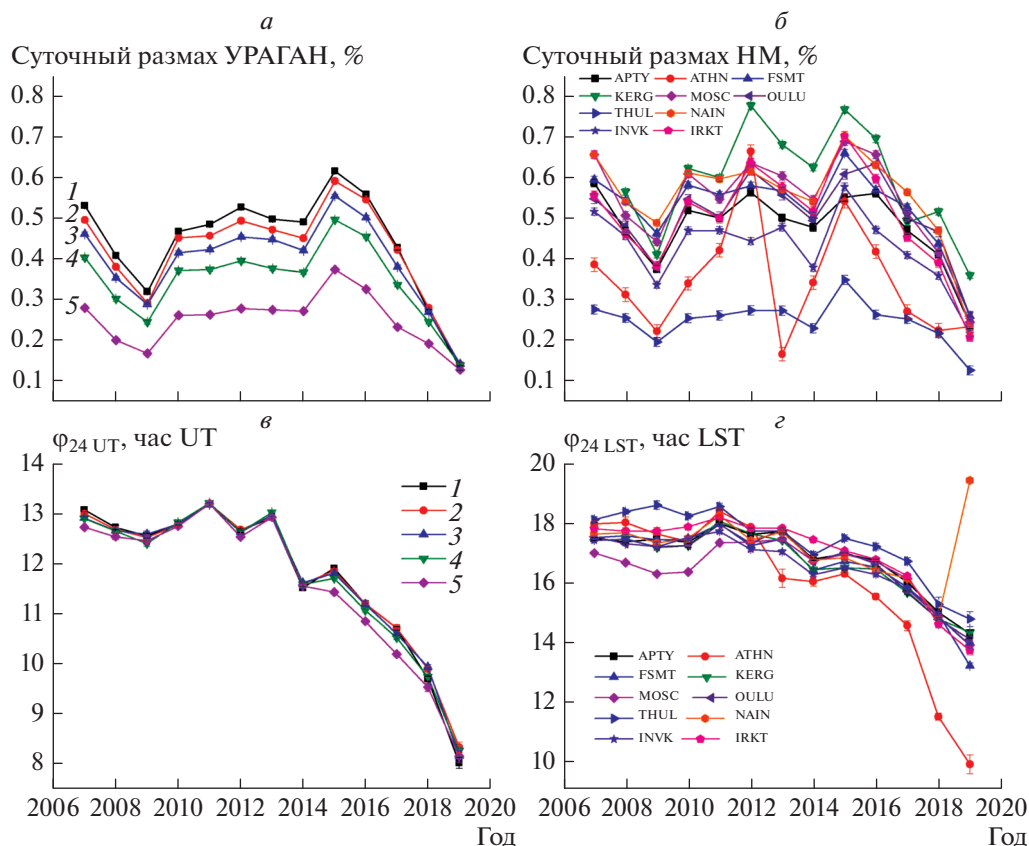


Рис. 1. Размах и фаза 24-часовой гармоники среднегодовых суточных отклонений скорости счета: размах по данным МГ УРАГАН (а); размах по данным нейтронных мониторов (б); фаза по данным МГ УРАГАН в часах UT (в); фаза по данным нейтронных мониторов в часах LST (г). Цифрами на рисунке обозначены диапазоны зенитных углов: 1 – 0°–17°, 2 – 17°–26°, 3 – 26°–34°, 4 – 34°–44°, 5 – 44°–70°.

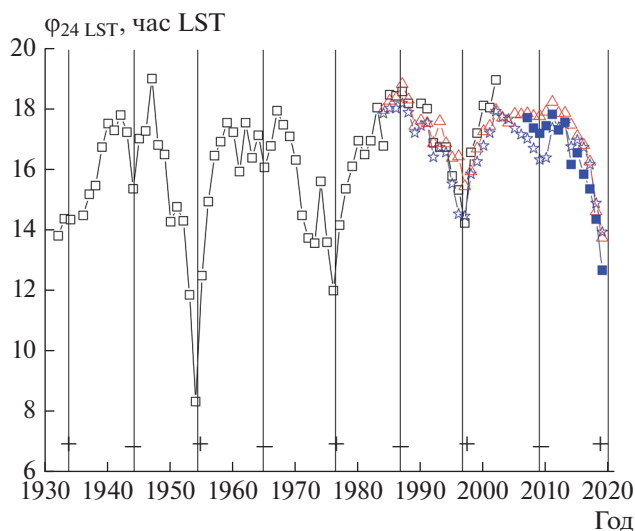


Рис. 2. Фаза 24-часовой гармоники среднегодовых суточных отклонений скорости счета в часах LST по данным ионизационных камер и нейтронных мониторов из работы [6] (открытые точки), по данным нейтронных мониторов MOSC (звездочки), IRKT (треугольники) и по данным МГ УРАГАН в диапазоне 0°–17° (сплошные квадраты).

согласие результатов предыдущих работ с результатами, представленными в данной работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Аномальное поведение среднегодовых суточных изменений скорости счета нейтронов и мюонов наземными детекторами в периоды минимума солнечной активности при положительной полярности, судя по многолетним наблюдениям, является закономерностью.

После смены полярности магнитного поля Солнца с отрицательной на положительную наблюдается сближение размахов суточных отклонений по данным МГ УРАГАН в различных диапазонах зенитных углов и по данным различных нейтронных мониторов. Это сближение становится максимальным в период минимума солнечной активности при положительной полярности Солнца.

В работе использованы данные, полученные на уникальной научной установке НЕВОД, при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (тема государственного задания № 0723-2020-0040).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Forbush S.E.* // J. Geophys. Res. 1969. V. 74. P. 3451.
2. *Duggal S.P., Forbush S.E., Pomerantz M.A.* // J. Geophys. Res. 1970. V. 75. P. 1150.
3. *Levy E.H.* // J. Geophys. Res. 1976. V. 81. P. 2082.
4. *Bieber J.W., Chen J.* // Astropart. J. 1991. V. 372. P. 301.
5. *Duldig M.L.* // Space Sci. Rev. 2000. V. 93. P. 207.
6. *Moraal H., Caballero-Lopez R.A., McCracken K.G., Humble J.E.* // Astropart. J. 2005. V. 629. P. 556.
7. *Mishra R.K., Mishra R.A.* // Pramana J. Phys. 2007. V. 68. No. 3. P. 407.
8. *Барбашина Н.С. и др.* // ПТЭ. 2008. № 2. С. 26; *Barbashina N.S. et al.* // Instrum. Exp. Tech. 2008. V. 51. P. 180.
9. *Шутенко В.В. и др.* // Геомагн. и аэронаом. 2013. Т. 53. № 5. С. 611; *Shutenko V.V. et al.* // Geomagn. Aeronomy. 2013. V. 53. No. 5. P. 571.
10. *Дмитриева А.Н., Барбашина Н.С., Ковыляева А.А. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 3. С. 417; *Dmitrieva A.N., Barbashina N.S., Kovylyayeva A.A. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. No. 3. P. 383.

Variation of cosmic ray muons in 2007–2019

V. V. Shutenko^{a,*}, N. S. Barbashina^a, A. N. Dmitrieva^a, E. I. Yakovleva^a

^a*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia*

^{*}*e-mail: VVShutenko@mephi.ru*

The analysis of diurnal variations of the cosmic rays muons measured with the muon hodoscope URAGAN from 2007 to 2019 is presented. Characteristics of yearly average of diurnal variations of counting rate in several zenith angle ranges are given. Comparison with diurnal variations of counting rate of neutrons according to ten neutron monitors is discussed.