

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА
СОЛНЕЧНО-СУТОЧНЫХ ВАРИАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ
В 20–25 ЦИКЛАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ
МЕТОДОМ СКРЕЩЕННЫХ МЮОННЫХ ТЕЛЕСКОПОВ**

**STUDYING DYNAMICS OF ENERGY SPECTRUM
OF SOLAR DIURNAL VARIATIONS IN COSMIC RAYS DURING
SOLAR ACTIVITY CYCLES 20–25,
USING METHOD OF CROSSED MUON TELESCOPES**

П.Ю. Гололобов 

*Институт космифизических исследований и аэрономии
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, gpeter@ikfia.ysn.ru*

В.Г. Григорьев 

*Институт космифизических исследований и аэрономии
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, grig@ikfia.ysn.ru*

С.К. Герасимова 

*Институт космифизических исследований и аэрономии
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, s_k_gerasimova@ikfia.ysn.ru*

P.Yu. Gololobov

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russia, gpeter@ikfia.ysn.ru*

V.G. Grigoryev

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russia, grig@ikfia.ysn.ru*

S.K. Gerasimova

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russia, s_k_gerasimova@ikfia.ysn.ru*

Аннотация. Регистрируемая наземными детекторами интенсивность космических лучей (КЛ) испытывает солнечно-суточные вариации (ССВ), связанные с существованием в околоземном космическом пространстве анизотропного углового распределения КЛ. Долговременные наблюдения показывают, что ССВ обнаруживают зависимость от цикла солнечной активности, испытывая периодические 11- и 22-летние вариации. Такое поведение ССВ связано с изменением характера распространения галактических КЛ в гелиосфере при изменениях ее состояния в цикле солнечной активности. С другой стороны, указанное явление может быть частично обусловлено изменением величины сноса КЛ геомагнитным полем, связанное с изменениями энергетического спектра ССВ.

Данная работа посвящена изучению динамики энергетического спектра ССВ в циклах солнечной активности. Решение этой задачи представляет определенные сложности, связанные с особенностями наземной регистрации КЛ и чувствительностью детекторов к изменениям состояния окружающей среды. Для этого используется подход, основанный на применении скрещенных мюонных телескопов, позволяющий обойти эти сложности. С этой целью проводится анализ данных измерений мюонных телескопов «Якутск», «Нагоя», «Сао-Мартиньо» и «Хобарт» за 1972–2022 гг. Показано, что в минимумах солнечной активности в периоды положительной полярности общего магнитного поля Солнца наблюдается значительное смягчение спектра ССВ КЛ. Полученные результаты обсуждаются.

Ключевые слова: космические лучи, солнечно-суточные вариации, энергетический спектр, мюонный телескоп.

Abstract. The cosmic ray (CR) intensity recorded by ground-based detectors experiences solar diurnal variations (SDVs) associated with the existence of anisotropic angular distribution of CRs in near-Earth space. Long-term observations show that SDVs exhibit a dependence on the solar activity cycle, experiencing periodic 11- and 22-year variations. Such behavior of SDVs is linked to a change in the nature of galactic CR propagation in the heliosphere when it changes during a solar activity cycle. On the other hand, this phenomenon can be partially due to a change in the magnitude of CR drift by the geomagnetic field associated with changes in the SDV energy spectrum.

In this work, we determine the dynamics of the SDV energy spectrum in solar activity cycles. The solution to this problem presents certain difficulties associated with peculiarities of ground-based CR recording and with the sensitivity of CR detectors to changes in the state of environment. Therefore, we employ an approach using crossed muon telescopes to estimate it, which allows us to bypass the above difficulties. We analyze data from Yakutsk, Nagoya, Sao Martinho, and Hobart muon telescopes for 1972–2022. It is shown that at solar minima during periods of positive polarity of the Sun's general magnetic field, a significant softening of the spectrum is observed. The results are discussed.

Keywords: cosmic rays, solar diurnal variation, energy spectrum, muon telescope.

ВВЕДЕНИЕ

Галактические космические лучи (ГКЛ), которые распространяются в гелиосфере, непрерывно подвергаются воздействию межпланетного магнитного поля (ММП) и солнечного ветра. Результатом такого взаимодействия является анизотропия углового распределения ГКЛ, наблюдаемая в околоземном космическом пространстве. Такое распределение проявляется в данных измерений наземных детекторов космических лучей (КЛ) в виде периодических 24-часовых колебаний регистрируемой интенсивности, называемых солнечно-суточными вариациями (ССВ). Известно, что в среднем амплитуды этих колебаний составляют десятые доли общей интенсивности, а максимум суточной волны приходится на 18 ч LT. Тем не менее, в солнечном цикле параметры ССВ испытывают существенные изменения, обусловленные изменениями состояния Солнца и, как следствие, всей области гелиосферы.

С начала исследований ССВ наземными детекторами основной задачей являлось определение анизотропии первичных КЛ в межпланетном пространстве. Такая задача осложнялась тем, что подход к определению анизотропии КЛ основан на необходимости охвата достаточно большой области небесной сферы за счет использования большого количества детекторов, расположенных в различных частях планеты, нередко разнотипных. Кроме того, чувствительность вторичных КЛ к изменению атмосферных параметров также представляла достаточно серьезную преграду. Помимо этого, наземные детекторы КЛ, являясь интегральными приборами, фиксирующими все частицы независимо от их энергии, имеют ограничения в исследовании энергетического спектра анизотропии. Поскольку ГКЛ — это заряженные частицы, магнитное поле Земли оказывает на них существенное влияние: изменяет траекторию движения частиц, а также для некоторых из них становится непреодолимым препятствием и приводит к формированию направлений, запрещенных для распространения. Поэтому использование данных наблюдений наземными приборами требует понимания процессов взаимодействия КЛ с геомагнитным полем и атмосферой Земли.

Одним из наиболее развитых методов определения пространственно-углового распределения КЛ в межпланетной среде по данным наземных измерений является так называемый метод приемных векторов (в англоязычной литературе *coupling coefficients*) [Крымский и др., 1966, 1967; Fujimoto et al., 1984], основанный на общих представлениях о взаимодействии КЛ с атмосферой и геомагнитным полем. Метод позволяет учитывать индивидуальные приемные характеристики детектора и оценивать всевозможные искажающие факторы для определения распределения КЛ. Единственным свободным параметром при использовании этого метода является энергетический спектр вариаций, который определяется на основе анализа большого количества данных за длительное время.

Отдельной важной задачей при использовании наземных детекторов является учет так называемого

температурного эффекта — влияния температурного режима атмосферы на процесс генерации и распространения вторичных КЛ к точке наблюдения. Это сильнее всего проявляется в мюонной компоненте КЛ. Учет данного явления требует знания плотностей температурных коэффициентов [Дорман, 1957] и температурного разреза атмосферы. Плотности температурных коэффициентов рассчитываются теоретически, а высотный ход температуры требует постоянных измерений с помощью шаров-зондов над пунктом наблюдения. Такие измерения в настоящее время проводятся всего два раза в сутки, что не позволяет с достаточной точностью учитывать температурный эффект. Несмотря на развитие современных методов дистанционного зондирования [Беркова и др., 2018] и наземных косвенных измерений параметров атмосферы [Nikolashkin et al., 2020], решение этой задачи все еще актуально. Оригинальным и надежным способом обхода этой проблемы является использование предложенного в ИКФИА СО РАН шестьдесят лет назад метода скрещенных телескопов [Скрипин и др., 1965; Скрипин, 1965].

Традиционно для определения энергетического спектра ССВ используются данные измерений высоко-, средне- и низкоширотных нейтронных мониторов, а также наземных и подземных мюонных телескопов [Rao et al., 1963; Riker et al., 1989; Ahluwalia, Sabbah, 1993; Pomerantz, Duggal, 1971]. Реализация такого подхода позволила определить как вид спектра, так и его динамику в цикле солнечной активности. Было показано, что ССВ слабо зависят от энергии КЛ и остаются постоянными до некоторой энергии — верхнего порога обрезания, которая в среднем составляет ~100 ГэВ и варьирует в цикле. Величина этих вариаций по разным оценкам различается: например, в работе [Hall et al., 1997] показано, что верхний порог обрезания составляет 100 ± 25 ГэВ, а согласно [Ahluwalia, 1992], он меняется в пределах 50–200 ГэВ в зависимости от напряженности ММП. По-видимому, разница в оценках заключается в исследовании разных временных интервалов с наборами разбросанных по планете станций, оснащенных разнотипными детекторами КЛ. Такой подход имеет недостатки: недостаточно точный учет атмосферных факторов и индивидуальных характеристик разнотипных детекторов неизбежно приводит к большим неопределенностям. В данной работе используется метод скрещенных мюонных телескопов, позволяющий учесть этот недостаток и наиболее достоверно оценить энергетический спектр ССВ.

ДАННЫЕ И МЕТОДИКА

Были использованы данные регистрации мюонных телескопов «Нагоя», «Хобарт» и «Сао-Мартиньо» глобальной сети GMDN [Okazaki et al., 2008; <https://cosray.shinshu-u.ac.jp/crest/DB/Public/main.php>], а также мюонный телескоп Якутского спектрографа КЛ, расположенный на поверхности Земли [Chuprova et al., 2009; <https://ysn.ru/ipm/>]. Основные характеристики детекторов представлены в таблице.

В данной работе для определения энергетического спектра ССВ использован оригинальный метод

Основные характеристики мюонных телескопов, использованных в данной работе

Станция	Направление	Географическое положение	Период регистрации	Скорость счета, имп/ч (на 01.01.2018)	Статистическая точность 1-часовой регистрации, %
Якутск	N30	62° N, 129° E	1972–2023	321 000	0.17
	S30			322 000	0.17
Нагоя	N2	35° N, 137° E	1971–2023	1 356 000	0.09
	S2			1 340 000	0.09
Хобарт	N2	43° S, 147° E	2006–2023	620 000	0.12
	S2			583 000	0.12
Сао-Мартиньо	N2	29° S, 306° E	2006–2023	891 000	0.11
	S2			916 000	0.10

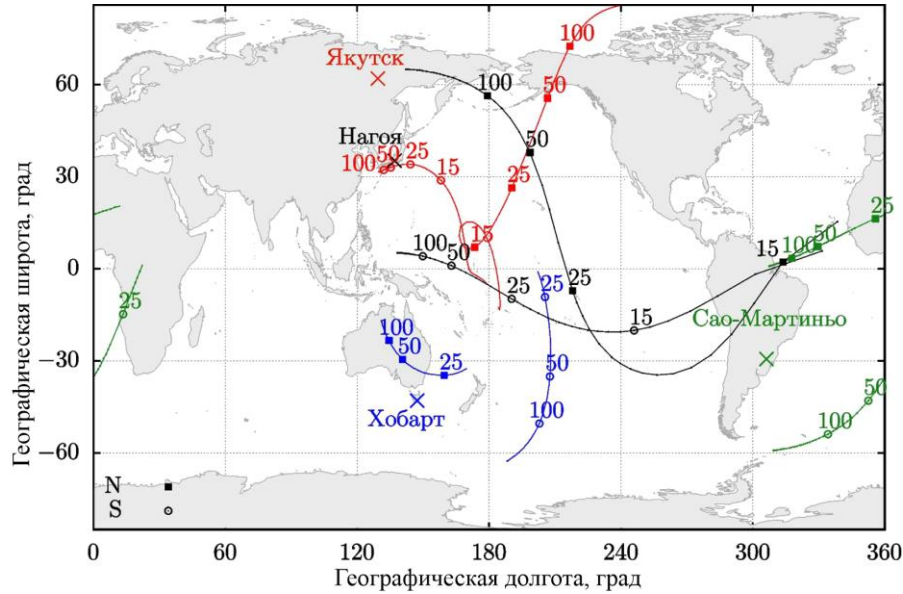


Рис. 1. Асимптотические углы прихода частиц в направлениях север и юг под зенитными углами 30° мюонных телескопов «Якутск», «Сао-Мартиньо», «Нагоя» и «Хобарт». Цифрами около точек — энергии (ГВ). Положения станций отмечены крестами

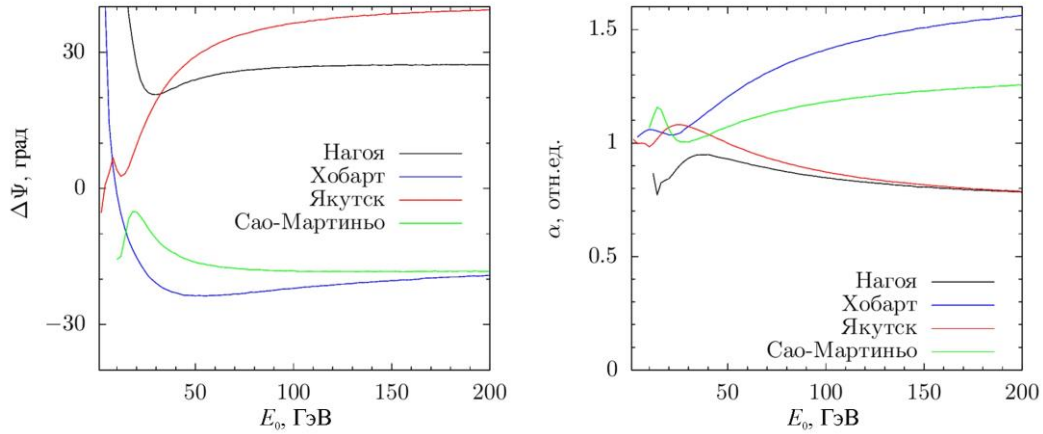
скрещенных телескопов [Скрипин и др., 1965]. Он основан на том факте, что вклад атмосферных факторов в данные регистрации пары направлений телескопа, обладающих идентичными диаграммами направленности, но разнесенных по азимуту, оказывается одинаковым. Поэтому разница интенсивностей, регистрируемых парой скрещенных направлений телескопа, заключает в себе вариации исключительно внеатмосферного происхождения, обусловленные различием чувствительности к первичной анизотропии КЛ.

В данной работе предлагается подход, несколько отличающийся от оригинального метода скрещенных телескопов, но позволяющий косвенно оценивать энергетические спектры вариаций КЛ. В качестве примера на рис. 1 показаны асимптотические углы прихода частиц с направлений север и юг, рассчитанные с помощью метода обратных траекторных расчетов [Дорман и др., 1971]. Видно, что в целом КЛ испытывают снос к экватору геомагнитным полем,

величина которого определяется как энергией, так и географическим положением детектора. При этом связь между асимптотическими углами прихода частиц и наблюдаемыми ССВ будет следующей: широта угла прихода частицы Φ будет определять амплитуду вариаций как $\cos\Phi$, а долгота Ψ — фазу ССВ. Соответственно разность фаз $\Delta\Psi(E) = \Psi_N(E) - \Psi_S(E)$ между северным и южным направлениями регистрации будет зависеть от энергии КЛ, так же как и отношение их амплитуд $\alpha(E) = \cos\Phi_N / \cos\Phi_S$. Таким образом, использование скрещенных телескопов позволяет оценить энергетические спектры вариаций КЛ, не прибегая к использованию большого количества разных детекторов.

Для точной оценки энергетического спектра будем учитывать индивидуальные характеристики детекторов при помощи метода приемных векторов [Крымский и др., 1966, 1967], используя выражение

$$z_n^m = x_n^m + iy_n^m = \frac{\int_{R_c}^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} W(E, \theta) f_n(E) N(\theta, \varphi) e^{im\Psi(E, \theta, \varphi)} P_n^m(\sin\Phi(E, \theta, \varphi)) dE d\varphi d\theta}{\int_{R_c}^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} W(E, \theta) f_n(E) N(\theta, \varphi) dE d\varphi d\theta},$$

Рис. 2. Результаты расчета $\Delta\Psi$ и α при различных значениях E_0

где θ , ϕ — зенитные и азимутальные углы; E — энергия частицы; $N(\theta, \phi)$ — диаграммы направленности детектора; $W(E, \theta)$ — коэффициенты связи; $f_n(E)$ — энергетический спектр n -х гармоник вариаций КЛ.

Таким образом, сопоставляя пары скрещенных (северных и южных) направлений мюонных телескопов, можно рассчитать ожидаемые значения разности фаз $\Delta\Psi$ и отношений фаз α :

$$\alpha = \left| z_1^1 \right|_S / \left| z_1^1 \right|_N,$$

$$\Delta\Psi = \Psi_N - \Psi_S,$$

где $\Psi = \arctan(y_1^1 / x_1^1)$.

При расчете $\Delta\Psi$ и α будем предполагать, что энергетический спектр имеет вид $f_1(E \leq E_0) = \text{const}$ и $f_1(E > E_0) = 0$, где E_0 — задаваемый нами верхний порог обрезания. Полученные результаты показаны на рис. 2.

Видно, что в области энергий $E_0 \lesssim 50$ ГэВ параметры $\Delta\Psi$ и α для всех станций неоднозначны. Северо-южная асимметрия $\Delta\Psi$ и α для $E_0 \gtrsim 50$ ГэВ является ожидаемой и обусловленной структурой геомагнитного поля. При энергиях выше 150 ГэВ зависимость параметров от E_0 исчезает вследствие увеличения прозрачности геомагнитного поля для КЛ таких энергий. Ниже проведем оценку E_0 посредством сопоставления рассчитанных нами значений $\Delta\Psi$ и α с наблюдаемыми при помощи метода наименьших квадратов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сопоставление результатов расчетов $\Delta\Psi$ и α с наблюдениями скрещенными мюонными телескопами показано на рис. 3. Видно, что E_0 испытывает 22-летние колебания, составляя в среднем 80 ГэВ и испытывая кратковременное падение до 20 ГэВ в периоды минимумов солнечной активности в эпохи положительной полярности общего магнитного поля Солнца. Указанное поведение E_0 согласуется с данными измерений мюонных телескопов, удовлетворительно описывая вариации $\Delta\Psi$ и α . Высокие значения E_0 в 1980–1991 гг. по сравнению с остальным периодом, очевидно, вызваны следующими причи-

нами: при оценке E_0 до 2005 г. в анализе участвовали лишь две станции «Якутск» и «Нагоя»; до 1990 г. Якутский мюонный телескоп обладал относительно низкой статистической точностью; при энергиях >100 ГэВ зависимости $\Delta\Psi$ и α от E_0 начинают ослабевать, поэтому возрастает неоднозначность при оценке E_0 . Поэтому справедливо считать, что такие высокие значения E_0 в эти годы обусловлены именно этими факторами. Тем не менее, на основе этих же данных можно утверждать, что указанный период характеризовался относительно высокими значениями E_0 .

Столь сильное падение E_0 до 20 ГэВ является неожиданно низким, хотя и согласуется с результатами работы [Ahluwalia, Sabbah, 1993]. При таком мягком спектре ССВ не должны наблюдаться детекторами КЛ, нечувствительными к таким энергиям. Действительно, низкоширотные нейтронные мониторы с большими порогами геомагнитного обрезания обнаруживают относительно большее падение амплитуды и смещение фазы в эти периоды, чем высокоширотные [Sabbah, 2013]. Кроме того, подземные мюонные телескопы не должны обнаруживать ССВ в эти периоды. Однако, как было показано в [Munakata et al., 2010], мюонным телескопом на станции «Матсуширо» с медианной энергией 0.6 ТэВ были зарегистрированы статистически значимые ССВ с амплитудами $\sim 0.04\%$, которые, впрочем, связывают с генерацией анизотропии за счет взаимодействия ГКЛ с нейтральной поверхностью гелиосферы, формирующей ССВ в области энергий >100 ГэВ [Kóta et al., 2008].

Отдельного внимания заслуживает форма энергетического спектра ССВ. Рассмотренный в данной работе спектр с верхним порогом обрезания не имеет теоретического обоснования, однако, как было показано в [Rao et al., 1963; Riker et al., 1989; Ahluwalia, Sabbah, 1993; Pomerantz, Duggal, 1971; Hall et al., 1997; Ahluwalia, 1992], наилучшим образом согласуется с измерительными данными. Действительно, проведенные нами вне рамок данной работы расчеты с использованием спектра ССВ, описываемого степенной функцией, показывают меньшую степень совпадения с наблюдательными данными. Тем не менее, нельзя исключать возможность того, что спектр может иметь иную форму и изменяться в цикле солнечной активности.

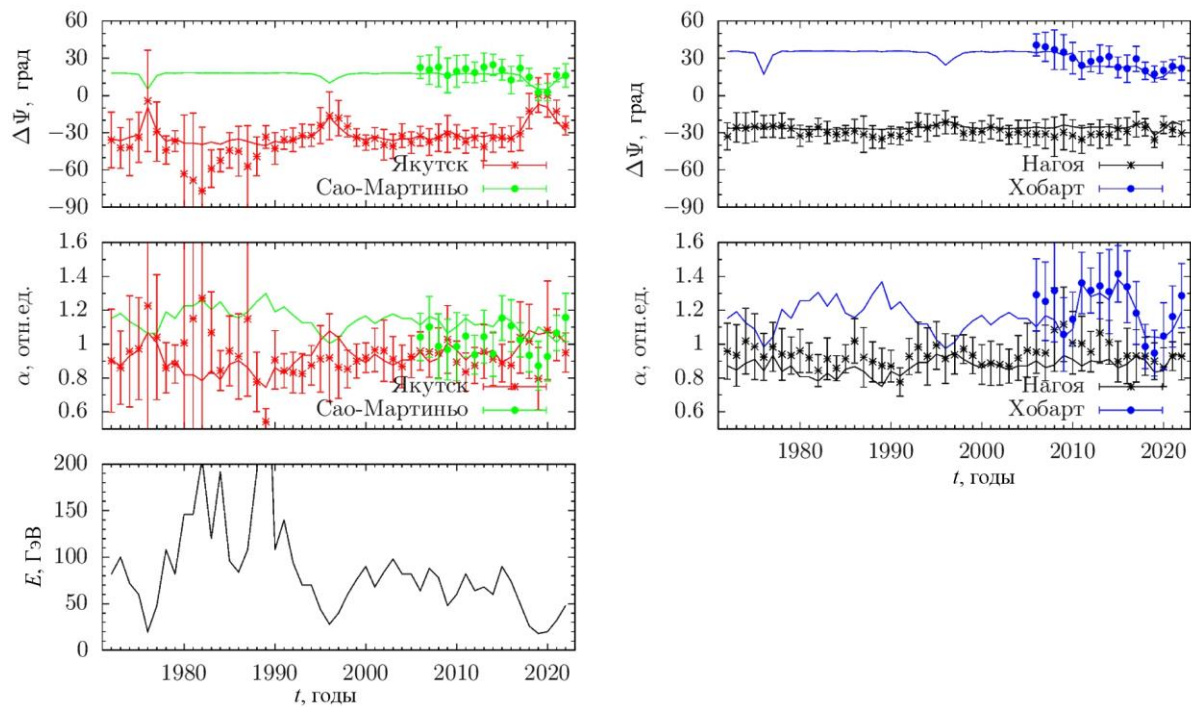


Рис. 3. Сопоставление результатов расчетов $\Delta\Psi$ и α и наблюдаемых скрещенными мюонными телескопами «Якутск», «Сао-Мартиньо», «Нагоя» и «Хобарт», а также результаты оценки за 1972–2022 гг. верхнего порога обрезания E_0

Как известно, зависимость гелиосферной модуляции ГКЛ от знака общего магнитного поля Солнца обусловлена их дрейфом. В эпохи положительной полярности дрейф направлен от высоких гелиоширот к низким [Герасимова и др., 2017], а в эпохи отрицательной полярности — наоборот. Такое поведение достаточно хорошо проявляется в данных 11-летних вариаций интенсивности КЛ [Гололобов и др., 2020]. Обнаруженное смягчение энергетического спектра ССВ в эти периоды может быть связано именно с этим явлением.

ВЫВОДЫ

На основе метода скрещенных телескопов проведена оценка динамики энергетического спектра ССВ в 20–25 циклах солнечной активности. Установлено, что в периоды минимумов при положительной полярности общего магнитного поля Солнца наблюдается существенное смягчение энергетического спектра ССВ. Учитывая знаковую зависимость спектра, можно заключить, что природа ее смягчения связана с дрейфом ГКЛ в гелиосфере. Полученные результаты могут служить дополнительным источником информации при разработке теории гелиосферной модуляции ГКЛ.

Авторы благодарят коллаборацию Global Muon Detector Network, (GMDN) [<http://hdl.handle.net/10091/0002001448>] за предоставленные данные. В работе использовались данные измерений станции космических лучей «Якутск», входящей в состав уникальной научной установки «Российская национальная наземная сеть станций космических лучей». Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема номер FWRS-2021-0012).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беркова М.Д., Григорьев В.Г., Преображенский М.С. и др. Температурный эффект мюонной компоненты, наблюдаемый на Якутском спектрографе космических лучей. *Ядерная физика*. 2018, т. 81, № 6, с. 673–682. DOI: [10.1134/S0044002718050045](https://doi.org/10.1134/S0044002718050045).
- Герасимова С.К., Гололобов П.Ю., Григорьев В.Г. и др. Гелиосферная модуляция космических лучей: модель и наблюдения. *Солнечно-земная физика*. 2017, т. 3, № 1, с. 63–78. DOI: [10.12737/23548](https://doi.org/10.12737/23548) // Gerasimova S.K., Gololobov P.Yu., Grigoryev V.G., Krivoschapkin P., Krymsky G., Starodubtsev S. Heliospheric modulation of cosmic rays: model and observation. *Sol.-Terr. Phys.* 2017, vol. 3, iss. 1, pp. 78–102. DOI: [10.12737/article_58f970f2455545.93154609](https://doi.org/10.12737/article_58f970f2455545.93154609).
- Гололобов П.Ю., Кривошапкин П.А., Крымский Г.Ф., Герасимова С.К. Исследование методом главных компонент влияния геометрии нейтрального токового слоя гелиосферы и солнечной активности на модуляцию галактических космических лучей // *Солнечно-земная физика*. 2020, т. 6, № 1, с. 30–35. DOI: [10.12737/szf-61202002](https://doi.org/10.12737/szf-61202002) // Gololobov P.Yu., Krivoschapkin P.A., Krymsky G.F., Gerasimova S.K. Investigating the influence of geometry of the heliospheric neutral current sheet and solar activity on modulation of galactic cosmic rays with a method of main components. *Sol.-Terr. Phys.* 2020, vol. 6, iss. 1, pp. 24–28. DOI: [10.12737/stp-61202002](https://doi.org/10.12737/stp-61202002).
- Дорман Л.И. *Вариации космических лучей*. М.: Гос. изд-во технико-теорет. лит. 1957, 492 с.
- Дорман Л.И., Смирнов В.С., Тясто М.И. *Космические лучи в магнитном поле Земли*. М.: Наука, 1971, 400 с.
- Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И., Чирков Н.П. и др. Распределение космических лучей и приемные векторы детекторов. I. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1966, т. 6, № 6, с. 991–996.
- Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И., Чирков Н.П. и др. Распределение космических лучей и приемные векторы детекторов. II. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1967, т. 7, № 1, с. 11–15.

- Скрипин Г.В. *Исследование анизотропии космических лучей методом скрещенных телескопов*. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Якутск, 1965, 184 с.
- Скрипин Г.В., Кривошапкин П.А., Крымский Г.Ф. и др. Изучение анизотропии космических лучей методом скрещенных телескопов. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1965, т. 5, № 5, с. 817–822.
- Ahluwalia H.S. A correlation between IMF and the limiting primary rigidity for cosmic ray diurnal anisotropy. *Geophys. Res. Lett.* 1992, vol. 19, iss. 6, pp. 633–636. DOI: [10.1029/92GL00525](https://doi.org/10.1029/92GL00525).
- Ahluwalia H.S., Sabbah I.S. The limiting primary rigidity of cosmic ray diurnal anisotropy. *Planet. Space Sci.* 1993, vol. 41, iss. 2, pp. 105–112. DOI: [10.1016/0032-0633\(93\)90038-4](https://doi.org/10.1016/0032-0633(93)90038-4).
- Chuprova V.P., Gerasimova S.K., Grigoryev V.G., et al. The brief history of experimental research of cosmic ray variations in Yakutia, *Adv. Space Res.* 2009, vol. 44, iss. 10, pp. 1200–1206. DOI: [10.1016/j.asr.2008.12.024](https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.12.024).
- Fujimoto K., Inoue A., Murakami K., Nagashima K. Coupling coefficients of cosmic ray daily variation for meson telescopes. *Report of Cosmic-Ray Research Lab. Nagoya University*. 1984, no. 9.
- Hall D.L., Duldig M.L., Humble J.E. Cosmic-ray modulation parameters derived from the solar diurnal variation. *Astrophys. J.* 1997, vol. 482, pp. 1038–1049. DOI: [10.1086/304158](https://doi.org/10.1086/304158).
- Kóta J., Munakata K., Yasue S., et al. The origin of solar diurnal variation of galactic cosmic rays above 100 GV. *Proc. 30th ICRC*. 2008, vol. 1, pp. 589–592.
- Munakata K., Mizoguchi Y., Kato C., et al. Solar cycle dependence of the diurnal anisotropy of 0.6 TeV cosmic-ray intensity observed with the Matsushiro underground muon detector. *Astrophys. J.* 2010, vol. 712, pp. 1100–1106. DOI: [10.1088/0004-637X/712/2/1100](https://doi.org/10.1088/0004-637X/712/2/1100).
- Nikolashkin S.V., Titov S.V., Gololobov P.Yu. The effect of winter stratospheric warmings on the intensity of the muon component of secondary cosmic rays. *Proc. 26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics*. 2020, vol. 11560. DOI: [10.1117/12.2575697](https://doi.org/10.1117/12.2575697).
- Okazaki Y., Fushishita A., Narumi T., et al. Drift effects and the cosmic ray density gradient in a solar rotation period: first observation with the global muon detector network (GMDN). *Astrophys. J.* 2008, vol. 681, pp. 693–707. DOI: [10.1086/588277](https://doi.org/10.1086/588277).
- Pomerantz M.A., Duggal S.P. The cosmic ray solar diurnal anisotropy. *Space Sci. Rev.* 1971, vol. 12, pp. 75–130. DOI: [10.1007/BF00172130](https://doi.org/10.1007/BF00172130).
- Rao U.R., McCracken K.G., Venkatesan D. Asymptotic cones of acceptance and their use in the study of the daily variation of cosmic ray radiation. *J. Geophys. Res.* 1963, vol. 68, iss. 2, pp. 345–369. DOI: [10.1029/JZ068i002p00345](https://doi.org/10.1029/JZ068i002p00345).
- Riker J.F., Ahluwalia H.S., Sabbah I.S. The limiting primary rigidities for the cosmic ray diurnal anisotropy during a solar magnetic cycle. *EOS: Trans. Am. Geophys. Union*. 1989, vol. 70, 1256.
- Sabbah I. Solar magnetic polarity dependency of the cosmic ray diurnal variation. *J. Geophys. Res: Space Phys.* 2013, vol. 118, pp. 4739–4747. DOI: [10.1002/jgra.50431](https://doi.org/10.1002/jgra.50431).
- URL: <https://cosray.shinshu-u.ac.jp/crest/DB/Public/main.php> (дата обращения 7 марта 2025 г.).
- URL: <https://ysn.ru/ipm/> (дата обращения 7 марта 2025 г.).
- URL: <http://hdl.handle.net/10091/0002001448> (дата обращения 7 марта 2025 г.).

Статья подготовлена по материалам Двадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 10–14 февраля 2025 г., Институт космических исследований РАН, Москва, Russia.

Как цитировать эту статью:

Гололобов П.Ю., Григорьев В.Г., Герасимова С.К. Исследование динамики энергетического спектра солнечно-суточных вариаций космических лучей в 20–25 циклах солнечной активности методом скрещенных мюонных телескопов. *Солнечно-земная физика*. 2025, т. 11, № 3, с. 50–55. DOI: [10.12737/szf-113202506](https://doi.org/10.12737/szf-113202506).